

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
(MESTRADO)

**POLLYANA CROCETTA BIAZIN**

**CARACTERÍSTICA SEDIMENTAR E HIDROLÓGICA DO RIO IVAÍ EM SUA  
FOZ COM O RIO PARANÁ, ICARAÍMA - PR**

MARINGÁ

2005

**POLLYANA CROCETTA BIAZIN**

**CARACTERÍSTICA SEDIMENTAR E HIDROLÓGICA DO RIO IVAÍ EM SUA  
FOZ COM O RIO PARANÁ, ICARAÍMA - PR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia (Mestrado) área de concentração: Análise Regional e Ambiental, do Departamento de Geografia do Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Dr. Manoel Luiz dos Santos

Co-orientado: Dr. Nelson V. L. Gasparetto

MARINGÁ-Pr

2005

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Manoel Luiz dos Santos, meus sinceros agradecimentos, não apenas pela orientação segura e eficaz demonstrada na elaboração deste trabalho, mas também pela grande amizade, apoio, carinho e incentivo dados nesses anos de convivência.

Ao prof. Dr. Nelson Vicente Lovatto Gasparetto, pelos conhecimentos transmitidos, pelo apoio e a grande amizade durante esses anos.

Aos prof. Dr. Paulo Fernando Soares, José Cândido Stevaux, Wilson Antonio Teixeira, pela amizade e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas e amigos Carolina Silva Barros, Marta Gaspar Sala, Sidney Kuerten, Aguinaldo Silva, Maurício Meurer, Débora Martins, Eduardo Moraes, Edilaine Valéria Destefani, Adilson Rodrigues Coelho, Ericson Hayakawa, Rafaela Harumi, Alexandre Corleone, Cristiano Pimentel, pela grande ajuda dada nos trabalhos de campo, laboratório e em gabinete, pelo carinho e incentivo com que me trataram, minha eterna gratidão. Aos amigos do volante, Sr. Irineu e “Fofão”, pela amizade e apoio nos trabalhos em campo.

À Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA, órgão do Governo Estadual do Paraná, que cedeu informações hidrológicas do rio Ivaí, em especial ao Edson Nagashima.

Ao LAGOGEF pelos empréstimos de equipamentos utilizados nas campanhas de campo.

Ao Grupo de Estudo Multidisciplinares do Meio Ambiente - GEMA, pela importante colaboração para o desenvolver desta pesquisa. Em especial à Maria de Moraes (laboratório de sedimentologia) pela atenção dada no aprendizado metodológico.

Ao CNPq, que proporcionou o desenvolvimento desta pesquisa, pela concessão da bolsa de estudos. À Fundação Araucária pelo financiamento da pesquisa “Regime hidrológico do rio Ivaí em seu curso inferior: ênfase a análise geoambiental”, que possibilitou tanto na aquisição de equipamentos, como no financiamento dos trabalhos de campo, dos quais decorre esta pesquisa.

Aos demais colegas e funcionários pelo apoio dado nos momentos necessários.

À minha família que em todos os momentos de dedicação a esta pesquisa, sempre me incentivaram, apoiaram e apostaram no meu potencial, minha eterna gratidão.

Ao meu noivo Cláudio, pelo apoio, amor, carinho e paciência necessários para a concretização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	12
1.1.1 <b>Uso do Solo</b> .....	18
1.1.2 <b>Precipitação e Clima</b> .....	20
1.3 OBJETIVOS.....	21
1.3.1 <b>Objetivo Geral</b> .....	21
1.3.2 <b>Objetivos Específicos</b> .....	21
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	28
3.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO.....	28
3.2 VELOCIDADE DO FLUXO, REMOÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	31
3.3 GEOMETRIA DAS FORMAS DE LEITO E QUANTIFICAÇÃO DA CARGA DE FUNDO.....	35
3.4 CARGA SUSPensa HIDROTRANSPORTADA E PROBLEMAS AMBIENTAIS...	40
<b>4 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS E SEDIMENTARES DO RIO IVAÍ</b> .....	42
4.1 PARÂMETROS HIDROLÓGICOS.....	42
4.2 VELOCIDADE MÉDIA DO FLUXO.....	42
4.3 REGIME HIDROLÓGICO DO RIO IVAÍ.....	44
4.3.1 <b>Hidrograma</b> .....	45
4.3.2 <b>Curva de Duração das Vazões</b> .....	46
4.3.3 <b>Período de Retorno das Vazões Máximas</b> .....	47
4.4 CARGA SEDIMENTAR E FORMAS DE LEITO.....	49
4.5 CARGA SUSPensa.....	55
4.6 GRANULOMETRIA E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS SEDIMENTOS.....	56
4.7 PARÂMETROS GRANULOMÉTRICOS.....	57
4.7.1 <b>Média ou Diâmetro Médio</b> .....	58
4.7.2 <b>Desvio Padrão ou Grau de Seleção</b> .....	58
4.7.3 <b>Assimetria</b> .....	58
4.7.4 <b>Curtose</b> .....	59

4.8 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS SEDIMENTOS.....	66
4.8.1 <b>Granulometria da primeira campanha</b> .....	66
4.8.2 <b>Granulometria da segunda campanha</b> .....	67
4.8.3 <b>Granulometria da terceira campanha</b> .....	68
4.8.4 <b>Granulometria da quarta campanha</b> .....	68
5 <b>CONCLUSÕES</b> .....	69
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Mapa de localização e uso do solo na área de estudo, no trecho inferior do rio Ivaí.....	15
Figura 02 –Modelo digital da seção do rio Ivaí.....	16
Figura 03 - Carta geomorfológica e geológica do trecho de estudo.....	19
Figura 04 - Localização da área de estudo dos perfis longitudinais e dos pontos de coleta...	22
Figura 05 - Período da realização das campanhas de campo para a Estação Novo Porto Taquara.....	24
Figura 06 - Ecossonda e GPS acoplada a um computador portátil.....	27
Figura 07 - Molinete fluviométrico.....	27
Figura 08 - Amostrador de fundo tipo Van Veen.....	27
Figura 09 - Amostrador de carga suspensa (garrafa de Van Dorn).....	27
Figura 10 - Material coletado sendo filtrado à vácuo.....	27
Figura 11 - Distribuição das formas de leito frente à diferença granulométrica e velocidade média (cm/s).....	37
Figura 12 - Modelo de representação para o cálculo do deslocamento de dunas.....	38
Figura 13 – Velocidade média na vertical (m/s).....	43
Figura 14 - Perfil transversal da seção com os pontos de coleta.....	44
Figura 15 - Hidrograma da vazão média diária para a Estação Novo Porto Taquara.....	46
Figura 16 - Curva de duração do fluxo.....	47
Figura 17 - Período de retorno para a Estação Novo Porto Taquara.....	48
Figura 18 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 2ª Campanha (perfil 2).....	50
Figura 19 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 3ª Campanha (perfil 2).....	50
Figura 20 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 4ª Campanha (perfil 2).....	50
Figura 21 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 2ª Campanha (perfil 3).....	51
Figura 22 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 3ª Campanha (perfil 3).....	51
Figura 23 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 4ª Campanha (perfil 3).....	51
Figura 24 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 2ª Campanha (perfil 4).....	52
Figura 25 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 3ª Campanha (perfil 4).....	52
Figura 26 - Perfil longitudinal do rio Ivaí, 4ª Campanha (perfil 4).....	52

Figura 27 - Distribuição da carga suspensa no período de coleta.....	56
Figura 28 - Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 05/12/03 (1ª Campanha).....	60
Figura 29 - Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 20/12/03 (1ª Campanha).....	61
Figura 30 - Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 07/06/04 (2ª Campanha).....	62
Figura 31 - Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 22/06/04 (2ª Campanha).....	63
Figura 32 - Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 28/09/04 (3ª Campanha).....	64
Figura 33 - Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 26/11/04 (4ª Campanha).....	65

#### LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Localização das coordenadas geográficas dos perfis longitudinais.....	23
Quadro 2 - Período de campanhas de amostragem, mostrando a vazão para o trecho de estudo e a cota do nível d'água em Icaraíma nos dias de coleta.....	49
Quadro 3 - Distribuição da velocidade e profundidade média durante as campanhas.....	57

#### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição superficial dos compartimentos geológicos da bacia hidrográfica do rio Ivaí.....	13
Tabela 2 - Estação fluviométrica e séries históricas.....	44
Tabela 3 - Distribuição do comprimento médio das formas de leito (metros).....	54
Tabela 4 - Distribuição da altura média das formas de leito (metros) .....	54

## RESUMO

A carga sedimentar transportada pelos rios possui diversas granulometrias e formas de transporte variados, de acordo com as condições locais e do escoamento. A dinâmica das formas de leito e suas características são de grande interesse para o entendimento da hidrologia, geomorfologia e eventos ambientais que possam ocorrer no rio. Esse trabalho visa estudar a dinâmica sedimentar no canal do rio Ivaí, próximo a foz com o rio Paraná. Buscando caracterizar os parâmetros hidrológicos, a distribuição dos sedimentos dentro do canal fluvial e sua variação temporal dentro de um período de 12 meses. No trecho estudado do rio Ivaí, o canal fluvial é ladeado por diques marginais com até 5 metros de altura e, sua largura aumenta para a jusante. O rio apresenta uma profundidade média de 5,95 metros e uma vazão média de 727,73 m<sup>3</sup>/s. Na sua foz com o rio Paraná, observa-se a presença de ilhas, indicando uma clara evidência do importante transporte de sedimentos que se realizam naquela área. O trecho estudado, mostra na margem direita a presença do leito rochoso (afloramento do Arenito Caiuá); no centro do canal, a granulometria de areia média a fina; e na margem esquerda, o leito é composto por areia fina com a presença de lama (argila-siltosa). As medições batimétricas permitiram caracterizar as formas de leito encontradas no rio Ivaí, enquadradas como dunas, com alturas que variaram de 0,09m a 1,22m e comprimentos de 4m a 47 metros. O presente trabalho mostra que o cálculo do deslocamento das dunas, não pôde ser aplicado e sugere que o mesmo só dê resultado em rios de grande porte, onde se pode encontrar formas de leito maiores.

**Palavras chave:** rio Ivaí, formas de leito, carga de fundo, distribuição granulométrica.

## ABSTRACT

Rivers carry suspended sediment loads of different grain size in different ways. Sediment transport depends on both runoff and watershed characteristics. To understand hydrology, geomorphology and other environmental events occurring in a river, it is very important to understand the dynamics of the riverbed features. This work aimed at studying the sediment dynamics in the lower course of the Ivaí River channel, more specifically close to its mouth with the Paraná River. We also described hydrological parameters, sediment distribution along the river channel and temporal variation during a hydrological cycle (12 months). At the lower course of the Ivaí River, the river channel is bordered by levees up to 5 meters high. These levees grow wider downstream. The river has an average depth of 5.95 meters and an average discharge of 727,73 m<sup>3</sup>/s. There are some islands at the mouth of the Ivaí River. These islands indicate that there is an important sediment transport/ deposition process within this reach. The studied stretch showed us that the river only in this right bank runs over bed rock (Sandstone of the Caiuá Formation, K). In the center bed material consists of fine to medium sand, and with predominance of fine sand and clay in the left bank. Bathymetric surveys performed on the Ivaí River helped characterize bed forms. Dune heights vary from 0.09m to 1.22 meters with lengths of 4m to 47 meters. Dune displacement could not be measured in this work, because this technique is suitable for large rivers only (larger bed forms).

**Key words:** Ivaí River, riverbed morphology, bed-load sediment, and granulometric distribution.

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos sedimentares são de vital interesse na conservação, desenvolvimento e utilização dos recursos hídricos. Dessa forma, o material e as formas de leito de um canal fluvial estão fortemente relacionados à dinâmica global do rio de tal forma que seus parâmetros característicos podem ser usados para o entendimento da hidrologia, geomorfologia e eventos ambientais que possam ocorrer no rio.

Os sedimentos transportados pelos rios podem ocasionar o assoreamento do canal fluvial, diminuindo a sua navegabilidade e aumentando as dimensões das enchentes. Este processo pode ocorrer pela remoção intensa do material das vertentes, por causa das práticas agrícolas de utilização das terras, das construções urbanas e de transporte em diversas áreas e da utilização dos cursos de água. O assoreamento de reservatórios diminui a sua vida útil, provoca necessidade de dragagens periódicas de alto custo, e, em alguns casos, inviabiliza o aproveitamento do rio para abastecimento e para a irrigação (PAIVA *et al.*, 2001).

Em alguns rios, a carga de fundo representa a parte principal da carga total, sendo de importância fundamental quando se pretende fazer projetos de canais navegáveis, de dragado de trincheiras para construções subfluviais, estudo da morfologia fluvial, etc (AMSLER, 1994).

Segundo Amsler *et al.* (2000), as partículas do transporte de fundo podem mover-se de diferentes modos, segundo a relação existente entre seu tamanho e a capacidade da corrente para transportá-las. O transporte de material de fundo se dá por saltos, rolamento ou deslizamento no interior de uma fina camada do escoamento, próxima ao fundo, definida como carga de fundo. Já a carga em suspensão, geralmente, é formada por partículas muito finas que se transportam, quase permanentemente, por suspensão, a uma velocidade aproximadamente igual a da corrente.

Os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrem um processo de transporte variado de acordo com as condições locais e do escoamento. As forças que atuam sobre a partícula podem mantê-la em suspensão ou no fundo do rio, saltando do leito para o escoamento, deslizando ou rolando ao longo do leito. Essa situação depende do tamanho da partícula, do peso e da forma. E também em função do regime de escoamento (se laminar ou turbulento liso, rugoso e transição) da velocidade da corrente, dos obstáculos no leito e de diversas outras funções que estão inter-relacionadas, tais como: a declividade do leito, a temperatura e a viscosidade da água, entre outras (CHRISTOFOLETTI, 1981). Quando essas

forças se reduzirem até a condição de não poderem continuar a deslocar a partícula, ocorre o processo de deposição.

Ao longo de um canal, há um gradiente de velocidade de fluxo d'água, o qual é estabelecido principalmente pelo atrito ocasionado pela rugosidade do leito do canal, densidade, temperatura do fluxo, declividade do canal, sendo geralmente mais lento nas porções próximas ao leito, na superfície e nas margens; mais rápido no núcleo do canal e, variável conforme a geometria do canal. Isso ocorre também com a concentração de sedimentos, que, por sua vez, ganha mais uma variável atuante: a granulometria do sedimento (SILVA et al., 2003). Sendo assim, o transporte de partículas de sedimentos é um parâmetro importante no estudo da regularização de cursos d'água, dos assoreamento de canais de navegação e reservatórios, dos trabalhos hidráulicos em geral.

O rio Ivaí drena uma das regiões mais ricas e densamente habitadas do estado do Paraná, sendo de suma importância para a economia regional, quer como fonte de abastecimento, quer no fornecimento de sedimentos para a indústria da construção civil. Infelizmente, a despeito destas características, o rio Ivaí é muito pouco estudado, não existindo estudos detalhados (publicados ou não) sobre seu regime hidrológico, sua dinâmica sedimentar.

Esse trabalho visa estudar a dinâmica sedimentar do rio Ivaí, próximo a foz com o rio Paraná. Para tanto, busca caracterizar os parâmetros hidrológicos, a distribuição dos sedimentos dentro do canal fluvial e sua variação espaço temporal dentro de um período de 12 meses. Busca ainda testar a metodologia proposta por Amsler e Prendes (2000), na quantificação de carga de fundo transportada pelo rio.

### 1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Ivaí abrange uma bacia hidrográfica de 35.914 km<sup>2</sup>, segunda maior do estado do Paraná, perdendo somente para o rio Iguaçu que apresenta aproximadamente 55.000 km<sup>2</sup> de área. Essas dimensões levam a bacia do Ivaí a ocupar cerca de 20% do território paranaense. O rio Ivaí estende-se por cerca de 685 Km desde suas nascentes, na confluência dos rios dos Patos com o rio São João, na divisa entre os municípios de Prudentópolis e Ivaí, no Terceiro Planalto Paranaense. A bacia desenvolve-se no sentido geral noroeste, orientando-se para oeste no baixo curso, até sua foz no rio Paraná (MAACK, 1981). Constitui-se ainda no único

tributário paranaense a desenvolver uma extensa planície de inundação e a mostrar a ocorrência de terraços fluviais a ela relacionados, como se verifica no seu curso inferior (área deste estudo).

Devido a baixa declividade nos últimos 50 Km, o rio Ivaí (neste trecho) apresenta condições favoráveis à navegação. Nos trechos superior e médio, a sua maior vocação é para aproveitamento hidrelétrico, estimando-se o potencial da bacia em 1320 MW (DNAEE, 1985). Os principais afluentes do rio Ivaí pela margem direita são os rios Alonso, Apucarana e Cambará; e pela margem esquerda, os rios Corumbataí, Mourão, Ligeiro e dos Índios.

A bacia hidrográfica do rio Ivaí estende-se sobre um substrato geológico composto basicamente por três compartimentos: Formação Serra Geral, Formação Caiuá ou sedimentos supra basálticos arenosos; Seqüência Paleozóica mais a Formação Botucatu (BITTENCOURT, 1982). Abaixo da corredeira de Ferro, no município de Tapira, o rio Ivaí principia a entalhar o seu leito no Arenito Caiuá (que cobre cerca de 23% da bacia). No curso inferior do rio, encontram-se afloramentos de conglomerados e antigos terraços fluviais (MAACK, 1981). De modo geral, a região noroeste do Paraná apresenta um relevo suavizado pouco ondulado, com vertentes predominantemente convexas. Associadas a essas formas, desenvolvem-se colinas alongadas com topos arredondados, planas ou convexas pouco marcadas. As porcentagens das áreas cobertas pelos compartimentos geológicos em relação ao total da bacia, constam na tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição superficial dos compartimentos geológicos da bacia hidrográfica do rio Ivaí.

Compartimento da Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Total ( %)
Bacia Total	35.914	100
Formação Caiuá	8.204	23
Formação Serra Geral	18.570	52
Formação Botucatu + Seqüência Paleozóica	9.100	25

Fonte: SUDEHMA, 198?.

O substrato da bacia hidrográfica é constituído desde a sua nascente até próximo ao seu segmento médio por uma geologia bastante complexa, compreendendo vários tipos de rochas sedimentares componentes das formações paleozóicas e mesozóicas. Rochas basálticas dominam o segmento médio do rio Ivaí e no segmento inferior seu curso fluvial percorre rochas sedimentares da Formação Caiuá (MINEROPAR, 2001).

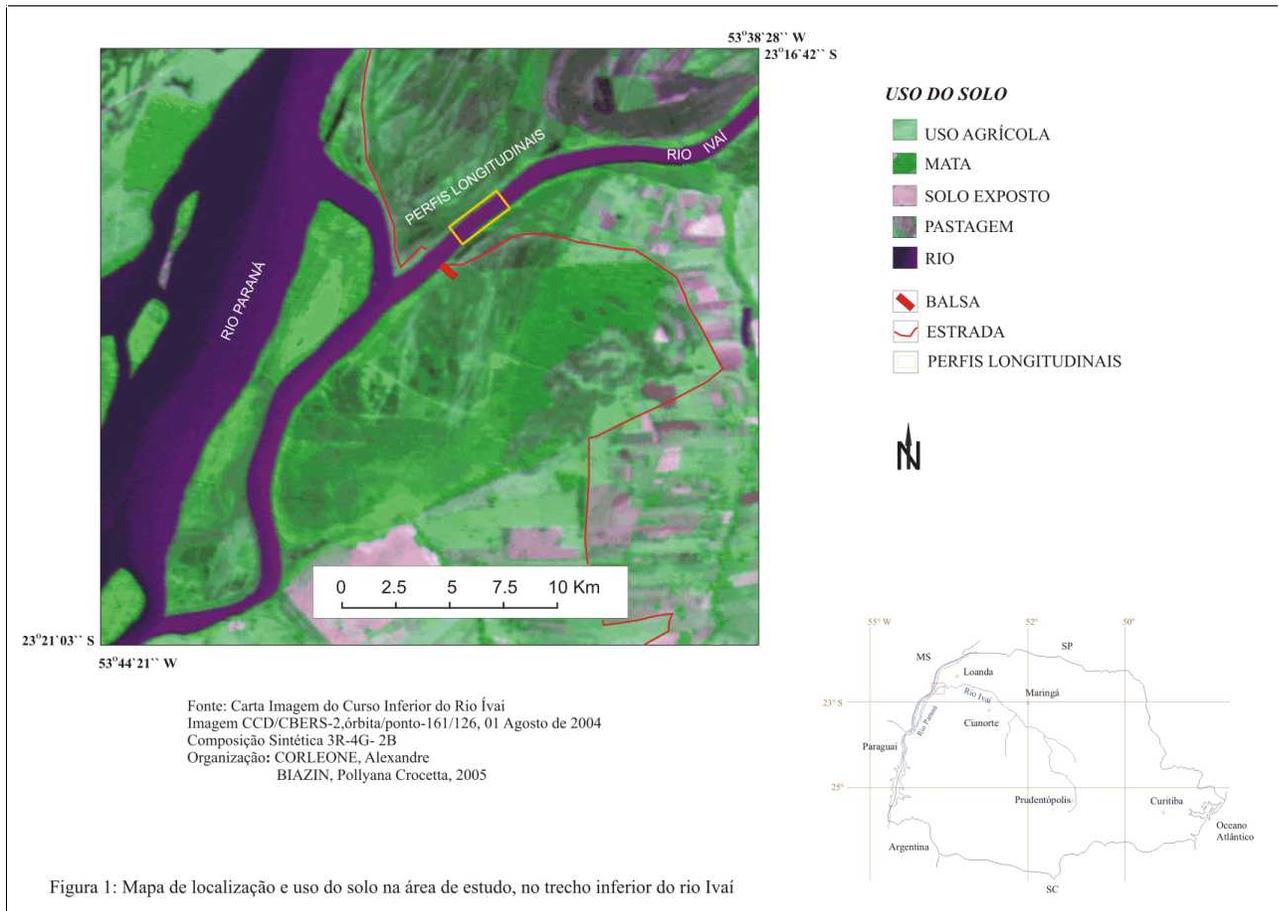
A literatura sobre a Formação Caiuá é muito rica, na qual vários autores como Santos (1997), Gasparetto (1999), Gasparetto e Souza (2003), Fernandez (1992) entre outros, apresentam várias interpretações acerca de sua origem, idade e constituição.

O Arenito Caiuá (Cretáceo Superior) é constituído principalmente por areia quartzosa das frações médias, fina a muito fina predominantemente, e friável, maciço ou com estratificação cruzada de grande porte, apresentando susceptibilidade a processos erosivos. Segundo Gasparetto e Souza (2003), a Formação Caiuá assenta-se de forma discordante sobre os basaltos e está recoberta por uma espessa cobertura pedológica de origem do próprio arenito.

A cobertura pedológica encontrada sobre o Arenito Caiuá, possui uma textura areno-argilosa, de composição predominantemente arenosa com silte e argila, com ou sem a presença de cascalhos na base. Os materiais que compõem essa cobertura porém, às vezes, são semelhantes às rochas sotopostas, ou mesmo alterações destas, dificultando a separação litológica das rochas (GASPARETTO e SOUZA, 2003). O constituinte principal da Formação Caiuá é o quartzo, que varia de 75% a 90% do total da rocha, posteriormente aparecem os feldspatos, microclínio e plagioclásio (entre 5% e 10%), além da calcedônia, opala e muscovita. É freqüente a presença de fragmentos líticos, principalmente de basalto alterado, folhelho, arenito, siltito e sílex, nunca, porém, ultrapassando 10% (SUGUIO, 1980).

O trecho inferior (que estende-se desde o município de Tapira até sua foz com o rio Paraná) da bacia é caracterizado por mesetas e largos platôs modelados pela erosão, profundamente entalhado a sudeste (PARANÁ, 1987). O trecho escolhido para os estudos do rio Ivaí está situado na sua região inferior, região de Pontal de Tigre, a poucos quilômetros da foz com o rio Paraná (Figura 1). O acesso à área é feito a partir da cidade de Icaraíma, por uma estrada vicinal de terra (estrada da Barra), transitável em todas as épocas do ano. Encontra-se em operação nesta área uma balsa para travessia do rio, dando continuidade à ligação entre as cidades de Icaraíma e Pontal do Tigre.

A vazão média do rio Ivaí, registrada pela Estação do Novo Porto Taquara, é de 660,82 m<sup>3</sup>/s durante o período estudado. A vazão mínima é de 201,6 m<sup>3</sup>/s (02/04/04) e a máxima de 4.968 m<sup>3</sup>/s (28/05/04) estes dados mostraram a grande amplitude no registro das vazões. A cota média registrada nesta mesma estação foi de 2,86 m, a cota mínima é de 1,08 m (02/04/04) e a cota máxima atingida no período estudado foi de 11,58 m (28/05/04).



O rio Ivaí, na área de estudo, apresenta uma profundidade média de 5,95 metros, chegando a 9 metros no mês de out/04 e 3,4 metros no mês de dez/03, ao longo dos quatro perfis. Embora o canal seja retilíneo, o talvegue é sinuoso e deslocado para o lado direito do canal (Figura 2), o que dá uma configuração assimétrica para o mesmo. Na sua foz com o rio Paraná, pode-se observar a presença de ilhas e barras de desembocadura mostrando a interdependência entre os fluxos do rio Ivaí e Paraná.

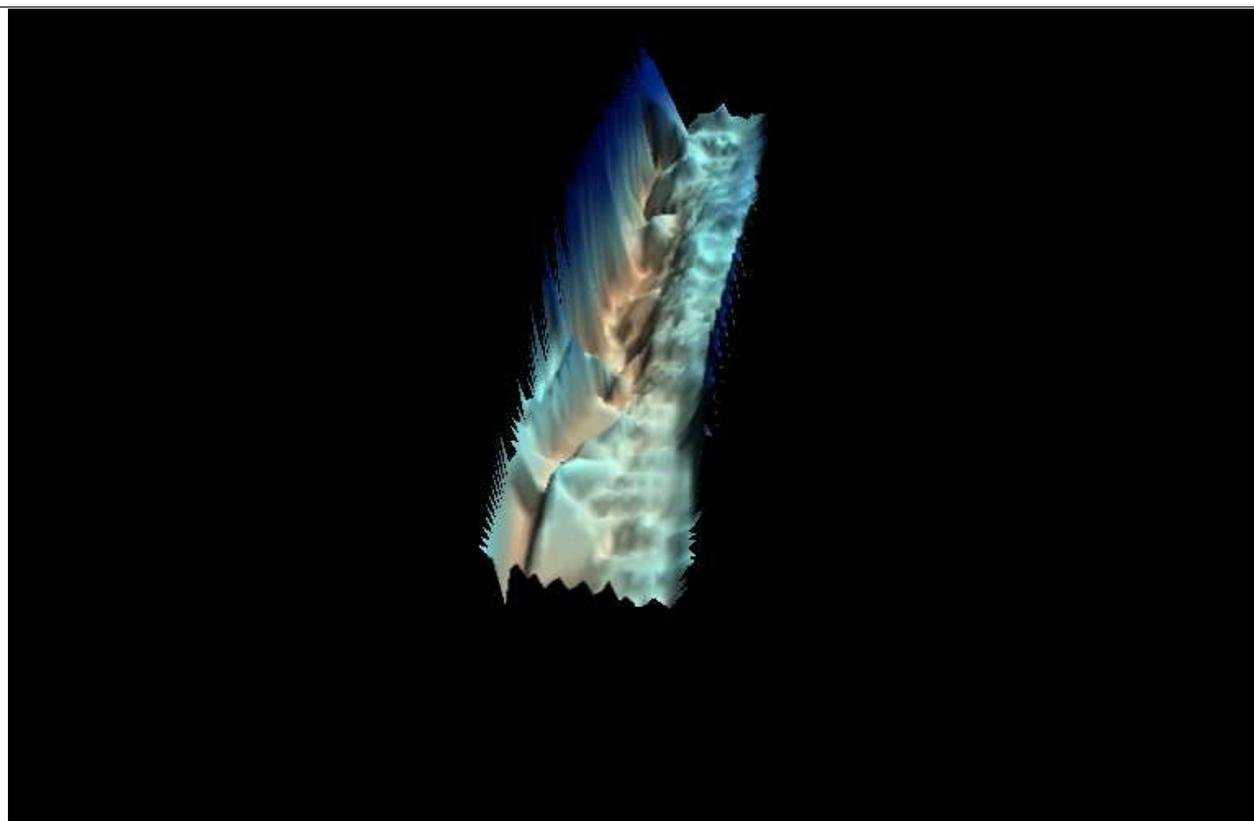


Figura 2: Modelo digital da seção do rio Ivaí.

A área de estudo caracteriza-se por possuir uma planície de inundação ampla que se funde com a do rio Paraná. O rio Ivaí, neste trecho, se apresenta encaixado com baixa declividade ( $4,258 \text{ cm/ Km}$ ) e, quando observado em planta, apresenta um padrão de canal sinuoso, entre altitudes de 230 e 240 metros. De modo geral, o canal aumenta sua largura para a jusante variando de 170 metros de largura do início da planície aluvial (Tapira – PR) para 250 metros de largura na região de sua foz (Icaraíma- PR). O canal do rio ao longo de quase todo o seu percurso é ladeado por diques marginais com até 5 metros de altura. De acordo com Gasparetto (1999),

junto às margens dos rios que drenam a região noroeste do Paraná, ocorrem depósitos recentes, na forma de terraços, com dimensões e espessuras variadas, estando sempre situados acima das planícies de inundação atual.

Os depósitos aluviais (Figura 3) estão distribuídos nas planícies do rio Ivaí, Ivaí/ Paraná e a do Paraná, e nos Terraços arenosos. O mapeamento geológico e geomorfológico feito por Santos et al. (2005) permitiu dividir a planície em seis unidades morfoestruturais: Planície Paraná/Ivaí, Planície Ivaí, Terraço Paraná, Terraço Ivaí, Leque Aluvial e Canal Fluvial.

De acordo com esses autores, a planície aluvial do rio Ivaí é composta por depósitos com mais de 20 metros de espessura, com a presença de pelitos e areia fina depositados em discordância sobre o Arenito Caiuá. Essa Formação aflora em alguns pontos na margem ou no leito do rio (margem direita). A planície aluvial desenvolve-se simetricamente ao canal, enquanto que lateralmente há presença de diques marginais com até 5 metros de altura. Com relação a largura da planície, observa-se que ela é maior em direção da foz com o rio Paraná (cerca de 15 km), formada pela dinâmica do rio Paraná e Ivaí. Na planície pode-se encontrar inúmeros paleocanais e espirais de meandro, de largura diversas, que nem sempre coincidem com o traçado atual do rio, demonstrando que o rio foi retrabalhado por processos de abandono de canal e de migração de meandros durante sua evolução.

Ocorre na região da foz do rio Ivaí, a Planície Paraná/Ivaí, construída pela dinâmica conjunta dos dois rios. A planície considerada como ativa, desenvolve-se numa região plana, disposta simetricamente ao canal do rio Ivaí. É formada por depósitos de argila e areia fina, que são cortados por paleocanais do rio Ivaí (depósitos de argila maciça rica em matéria orgânica). O dique marginal se desenvolveu apenas ao longo da margem esquerda do rio Ivaí. Atrás deste dique, pode-se observar a presença de pântanos e alagadiços, nas regiões mais baixas da planície. A separação dessa planície com as demais é bem marcada; o Terraço Ivaí apresenta elevação no terreno, com uma superfície erosiva (3 metros de desnível); e o Terraço Paraná apresenta uma superfície erosiva de 8 metros de altura aproximadamente.

Para o Terraço Paraná, Santos et al. (2005), descreve que essa unidade desenvolve-se paralela ao canal do rio Paraná e é formada principalmente por depósitos de areia fina e média maciça, associada a dinâmica sedimentar do rio. Nessa área podem-se encontrar inúmeras lagoas, com dezenas a centenas de metros de diâmetro. Ocorrem também depósitos de turfa (próximo ao rio Paraná), com depósitos de areia fina rica em matéria orgânica na sua base. Por estar cerca de 8

metros acima da planície Paraná/Ivaí, o terraço Paraná limita as cheias do rio a unidade anterior, impedindo que as áreas da planície Ivaí mais distantes com baixas declividades e alturas, sejam inundadas por esse processo.

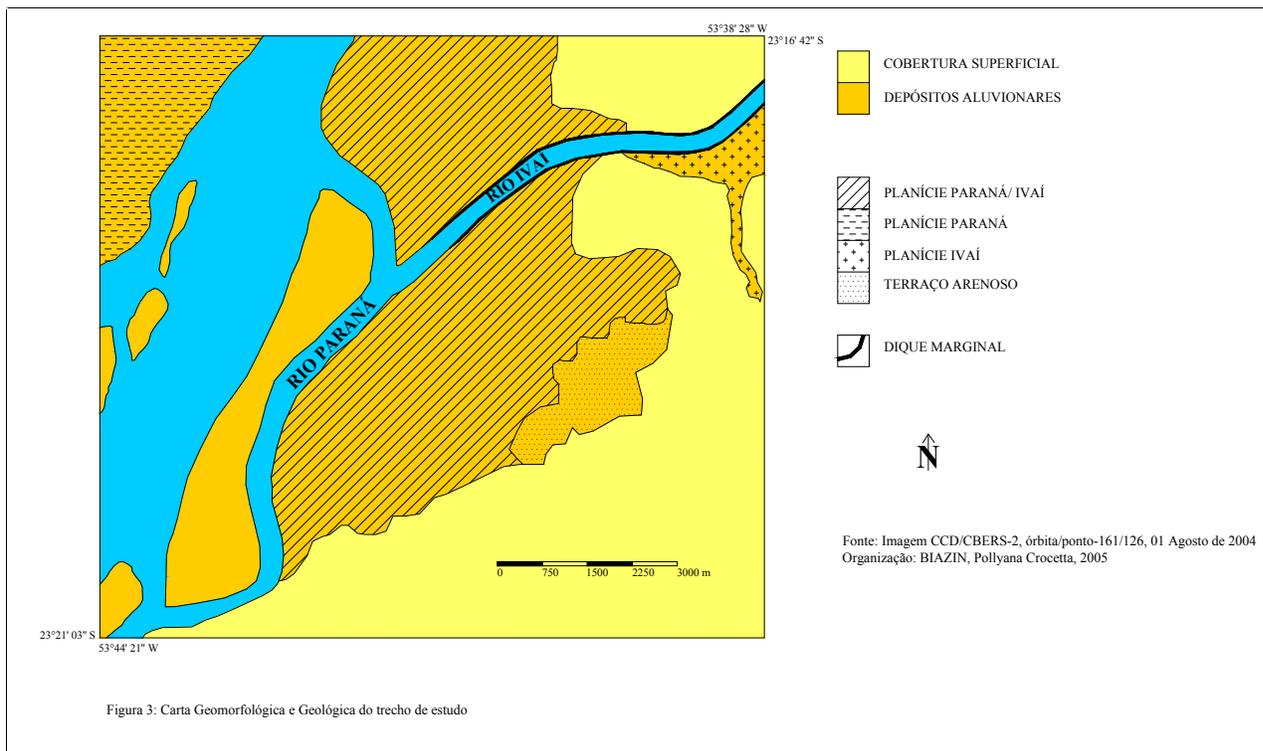
### 1.1.1 Uso do solo

O rio Ivaí possui uma das bacias mais industrializadas do Paraná, sendo intensivamente utilizada por diversas atividades agropecuárias. O uso do solo (Figura 1) neste trecho é marcado em sua grande parte pela presença de agricultura e pastagem e de alguns resquícios de mata. A ocupação do solo, especialmente intensa nesta porção do estado, fez com que, da cobertura vegetal originária, restassem apenas algumas áreas testemunhas. Uma pequena parte da mesma pode ser encontrada em “capões” isolados, em pequenas reservas particulares ou, ainda em alguns pontos ao longo do rio sobre os diques marginais. A urbanização, as rodovias e, principalmente a atividade agrícola, foram os responsáveis pela transformação da paisagem.

Na área de estudo, atualmente, dominam as culturas fornecedoras de matéria prima às indústrias como a cana, a soja, o trigo, o algodão e o milho. Além das criações bovinas, ovinas, suínas, caprinas e de aves. Podem ser vistas na região, algumas áreas de reflorestamento, sobretudo com eucaliptos e grevileas.

Nas margens dos grandes rios do Terceiro Planalto Paranaense, encontram-se os depósitos de sedimentos finos, que fornecem a matéria prima, a argila, utilizada nas fábricas de cerâmicas e tijolos da região. Essas fábricas e olarias são as grandes responsáveis pela retirada da vegetação. A lenha que é extraída para a queima dos tijolos, cerâmicas e telhas, traz grandes conseqüências para o meio físico, a fauna, a flora, a fertilidade do solo e o assoreamento dos rios.

Uma outra preocupação apontada por Gasparetto e Souza (2003) é a de que a cobertura pedológica apresenta sérias limitações ao uso do solo, devido a alta susceptibilidade a erosão hídrica e eólica, degradando-se de forma rápida quando expostos a intempéries, desenvolvendo baixa acidez e fertilidade, prejudicando assim, o desenvolvimento agropecuário da região.



### 1.1.2 Precipitação e Clima

O regime de distribuição da precipitação no Estado do Paraná apresenta uma uniformidade bem marcada, ou seja, não fica evidente a separação entre período chuvoso e período seco, o que não significa a ausência destes períodos, mas a amplitude entre os dois não é muito grande, como geralmente acontece em outras regiões. Por esta razão, fica difícil prever qual será o trimestre mais chuvoso na região sul-brasileira (ANDRADE, 2003). Essa homogeneidade na distribuição das chuvas pode levar as máximas e mínimas anuais ocorrerem em qualquer estação do ano.

Andrade (2003) no seu estudo de variabilidade da precipitação na bacia hidrográfica do rio Ivaí, diz que essa bacia apresentou uma definição de períodos chuvoso e seco, apesar de não ser tão marcada. Os meses mais chuvosos geralmente se concentram no trimestre dezembro/janeiro/ fevereiro, enquanto os meses mais secos são junho/ julho/ agosto. Essa asserção de Andrade (op. cit.) não condiz com o verificado para o ano de 2004, que, nos meses de maio, junho e novembro foram marcados com uma grande concentração de chuvas, deixando a vazão acima da média anual.

Quanto à distribuição sazonal das chuvas, é importante observar que a alta concentração de chuvas no fim da primavera, coincide com a época em que grande parte dos terrenos está desprotegida pela ausência de vegetação, devido ao preparo da terra para as culturas de verão (BITTENCOURT, 1982). Esse fato é refletido no aumento da concentração de carga suspensa, observado no rio Ivaí, quando a água fica mais turva.

A bacia do rio Ivaí se localiza numa região de transição de baixa latitude para média, tendo características tanto de clima temperado como subtropical. O clima nos cursos inferior e médio da referida bacia é do tipo Cfa, isto é, clima mesotérmico (temperatura média do mês mais frio abaixo de 18°C), subtropical úmido, sem estação seca, com verões quentes e geadas menos freqüentes, com tendência a concentração de chuvas nos meses de verão, apresentando temperatura média do mês mais quente acima de 22°C (DNAEE, 1985).

O clima subtropical que predomina na maior parte do 3º Planalto permitiu no decorrer de milhares de anos, que aí se instalassem as seguintes formações vegetais: mata latifoliada tropical ao norte, mata tropical de planalto na porção central e, mata de araucárias e campos na porção sul (TROPMAIR, 1990).

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 **Objetivo geral**

Estudar a dinâmica sedimentar no canal do rio Ivaí, na sua foz, buscando conhecer seus processos atuais e sua importância no transporte de sedimentos.

#### 1.3.2 **Objetivos específicos**

Analisar qualitativamente a carga sedimentar transportada.

Identificar as formas de fundo presentes.

Testar a aplicabilidade da metodologia de quantificação de carga de fundo hidrotransportada, proposta por Amsler e Prendes (2000), para o rio Ivaí.

Determinar as geometrias das formas de leito, sua altura e comprimento, obedecendo ao ciclo cheia-vazante.

Verificar a relação entre as geometrias das formas de leito e as características hidráulicas do escoamento.

Estimar a velocidade de deslocamento das formas de leito.

Conhecer a dinâmica das formas de leito do canal fluvial.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A dinâmica erosiva e sedimentar atual foram verificadas através do estabelecimento de perfis longitudinais ao canal e da coleta de amostra de sedimento de fundo e de suspensão, em pontos pré-determinados nestes perfis. Para a localização dos pontos e confecção dos perfis foram usados ecobatímetro e GPS.

No trecho escolhido, foram definidos 4 pontos (1, 2, 3 e 4) distribuídos ao longo de uma seção transversal (Figura 4). Cada ponto foi à origem de uma seção principal ecobatimétrica, obtida com o barco navegando no sentido da corrente, as seções longitudinais (1, 2, 3 e 4) tinham 1500 metros de extensão. As seções foram escolhidas segundo a geometria do canal buscando-se um trecho retilíneo. Privilegiou-se esta seção em Icaraíma por estar à cerca de 1 km da foz com o rio Paraná e também devido a facilidade de acesso e de logística de apoio para os trabalhos de campo.

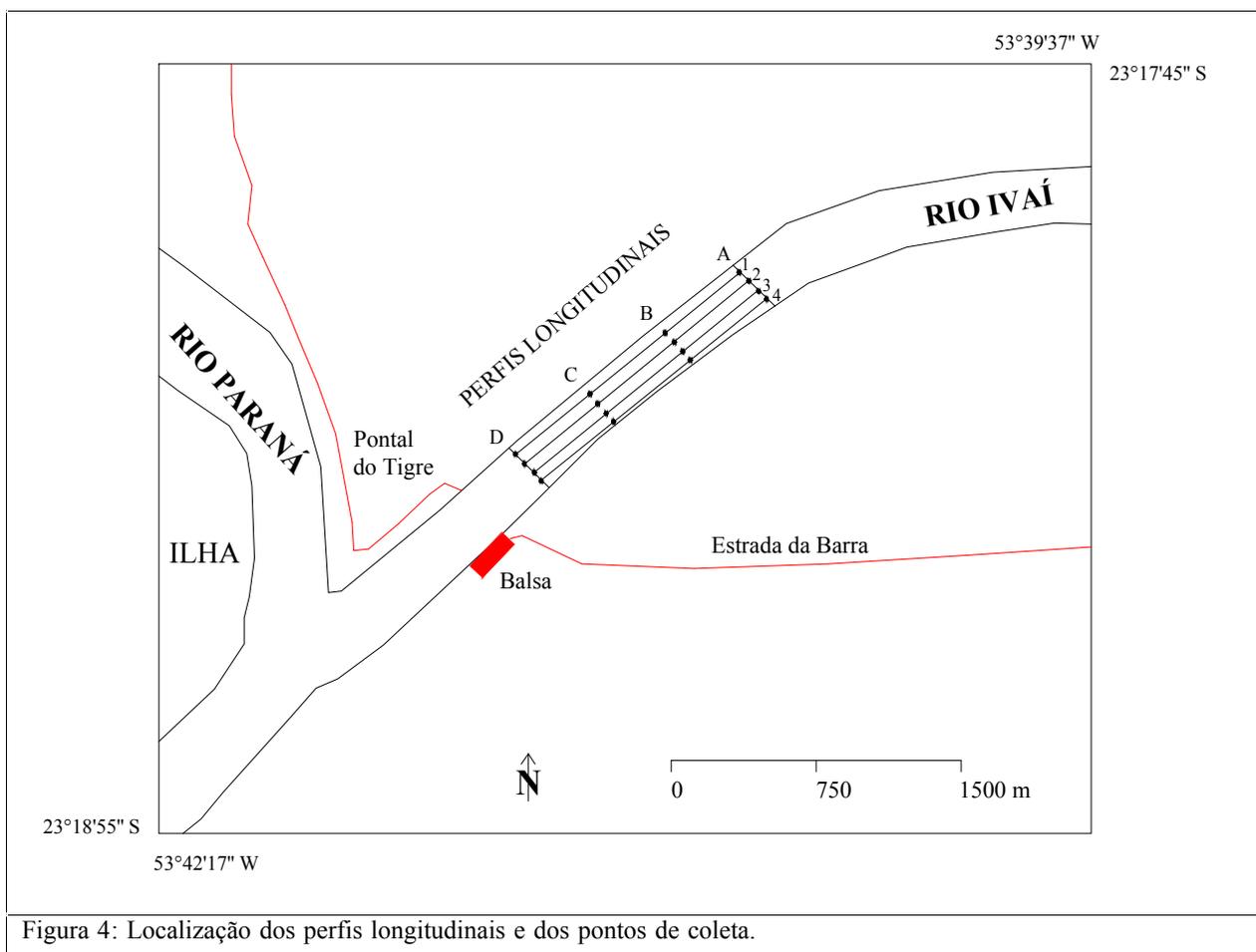


Figura 4: Localização dos perfis longitudinais e dos pontos de coleta.

Para as coletas de dados, nos meses subseqüentes, procurou-se percorrer os perfis levantados no período anterior, com auxílio do GPS (Quadro 1). A partir desses perfis longitudinais foram traçados pontos que a cada 500m foram marcados como pontos de coleta para carga de fundo, suspensão e velocidade de corrente em diferentes profundidades. Sendo assim, cada perfil longitudinal teve quatro pontos de amostragem ao longo dos 1500 metros.

Perfil	Comprimento (m)	Coordenada Inicial		Coordenada Final	
		Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
Perfil 1	1500	23°17'18"S	53°40'40,2"W	23°17'52,4"S	53°41'21,2"W
Perfil 2	1500	23°17'25,9"S	53°40'39,4"W	23°17'55,7"S	53°41'19,4"W
Perfil 3	1500	23°17'28,1"S	53°40'39,2"W	23°17'58,8"S	53°41'18,3"W
Perfil 4	1500	23°17'30,1"S	53°40'38,1"W	23°17'59,6"S	53°41'18,2"W

Quadro 1 – Localização das coordenadas geográficas dos perfis longitudinais.

As coletas de amostras tenderam a obedecer um ciclo completo de cheia-vazante-cheia do rio Ivaí, para assim possibilitar a análise da variabilidade anual na oferta de sedimentos e as dinâmicas do(s) talvegue(s) e das formas de leito no canal. A frequência adotada para a realização dos levantamentos de campo foi aproximadamente de 30 – 40 dias para as situações de águas médias e se reduziu a 10 - 15 dias nos casos de crescente (TRENTO et al., 1990). Para esse estudo foram realizadas quatro campanhas de campo (Figura 5), cada uma com dois levantamentos ecobatimétricos, nos meses de dezembro/2003, junho/2004, setembro/outubro/2004 e novembro/2004. A primeira campanha ocorreu em um período com descarga média ( $431,53 \text{ m}^3/\text{s} - 664,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a segunda foi num período com descarga acima da média anual ( $988,86 \text{ m}^3/\text{s} - 777,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a terceira foi feita num período de estiagem e cheia ( $273,82 \text{ m}^3/\text{s}$ ), mas a segunda coleta dessa campanha, ocorreu num pico de cheia ( $2162,97 \text{ m}^3/\text{s}$ ), prejudicando o acompanhamento das dunas. Já a quarta campanha ocorreu num período de vazante ( $678,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com levantamentos de dois dias de intervalo para analisar o comportamento das dunas num período mais curto.

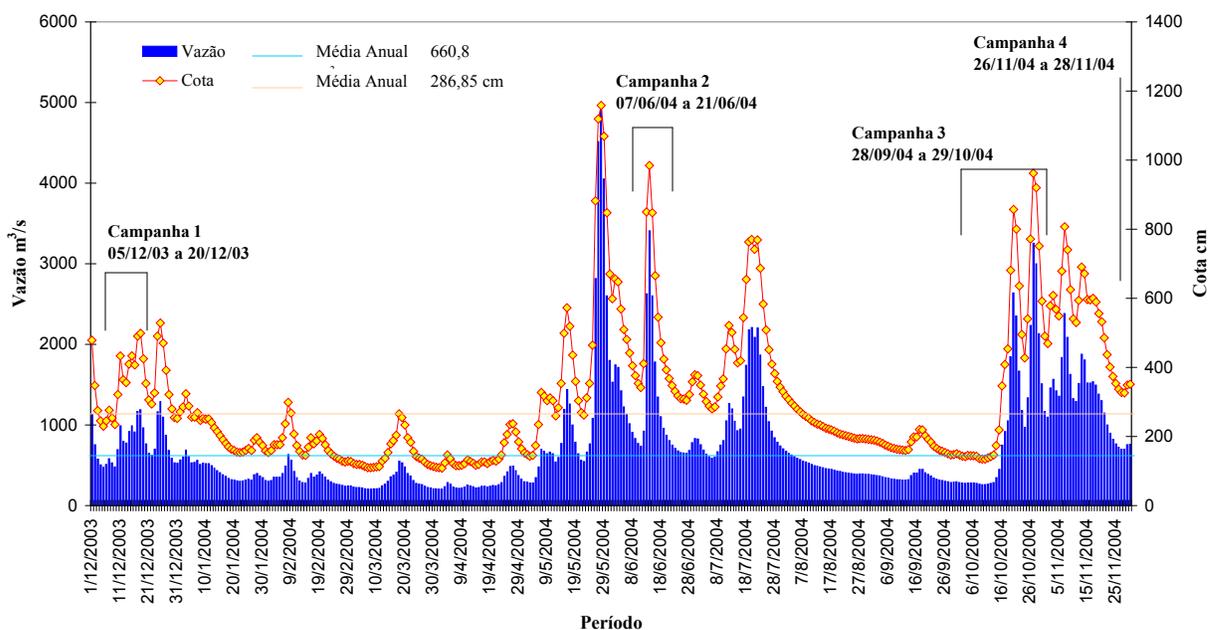


Figura 5: Período da realização das campanhas de campo para a Estação Novo Porto Taquara.

O sistema utilizado para coleta dos dados batimétricos foi constituído de uma ecossonda modelo *Furuno GP-1650F* e um *Sistema de Posicionamento Global (GPS)*, acoplados a um computador portátil (Figura 6). O *software Fugawi3<sup>®</sup>* fez o processamento do sinal e o armazenamento dos dados, que pode ser exportados em formato de tabelas para outros *softwares*. Os valores de profundidade emitidos continuamente pelo ecobatímetro foram registrados juntamente com seu posicionamento determinado pelo GPS a cada segundo. O produto final foi uma lista dos três elementos de posicionamento do fundo do canal: latitude, longitude e profundidade. A correspondência entre as medições de posição (fornecidas pelo GPS) e as medições de profundidade (fornecidas pela sonda) permitiu obter um conjunto de pontos de profundidades, referenciadas geograficamente, a partir dos quais se estimam as superfícies batimétricas do fundo do rio, podendo ser expressa em profundidades ou em cotas (ALVARES et al, 2000). Por meio do programa de computação “*SURFER<sup>®</sup>*” e “*AUTOCAD<sup>®</sup>*” os dados foram convertidos em perfis batimétricos geo-referenciados.

O aparelho utilizado para a medição da velocidade foi o molinete fluviométrico (Figura 7), aparelho esse que permite a determinação das velocidades através das contagens do número

de rotações de sua hélice em um dado período de tempo. O molinete foi colocado na água, suspenso na posição vertical. A velocidade do curso d'água foi medida em m/s no momento de cada coleta, em diferentes profundidades. A equação de ajuste do molinete foi dada por:

$$\frac{n^{\circ} \text{ bips} \times 10}{60} = N$$

Se  $N$  for:  $3,103 \leq V = 0,27037 \times N + 0,0068$  ou  $3,103 > V = 0,27688 \times N - 0,0134$ .

Um coletor de amostra de fundo do tipo Van Veen (amostrador de mandíbulas, Figura 8) foi utilizado para amostragem do material de fundo. Foram coletadas 4 amostras do material de fundo ao longo de cada perfil longitudinal. A determinação precisa do calibre do material do leito do canal foi fundamental para o cálculo da carga. Para determinar o tamanho das partículas do material de fundo, usou-se o método do peneiramento. Inicialmente o material coletado foi secado a temperatura ambiente. Após a secagem, utilizou-se uma série de peneiras padronizadas, agitadas mecanicamente durante cinco minutos. Quando a granulometria do material sólido da amostra apresentou diâmetros em gradação, desde o da areia até os do silte e da argila, usou-se o método da pipetagem para a classificação da porção silte/argila e do peneiramento para análise da areia (SUGUIO, 1973). Os dados foram tratados pelo programa GRANULO (UNESP).

Nas amostras com presença de matéria orgânica, foi feita a queima da mesma usando 50 mL de peróxido de hidrogênio para 50g da amostra. Então a amostra foi colocada sobre uma chapa aquecedora a 40° C, depois elevada a 80° C, a qual fica queimando até próximo a secura. Depois de secado na estufa, o material foi destorroado novamente e preparado para a pipetagem (20g da amostra para 1L de água destilada).

A carga suspensa foi coletada com um amostrador pontual denominado garrafa de Van Dorn (Figura 9), que consiste num tubo de PVC com as duas extremidades abertas e com as tampas presas a um gatilho, o qual foi ativado com o lançamento de um peso (mensageiro). A seguir, foi armazenada em frascos plásticos com capacidade de 5 litros. A análise da carga em suspensão (em g/L) em cada ponto, foi feita com o auxílio do método de filtragem e pesagem dos filtros (MELO, 1975). Para quantificar esse material, foram separados 1 L de amostra total que serão filtradas em cadinhos munidos de filtros de fibra de vidro de 47 cm de diâmetro e 0,5 mm de abertura da malha (Microfiltro de fibra de vidro de 0,2µm – GF 52-C Ø 47mm). Esses recipientes têm capacidade máxima de 250 mL. Essa operação foi acelerada com o uso de uma bomba de vácuo, adaptada ao recipiente coletor do material filtrado (Figura 10). O resíduo da

filtragem, detido no cadinho pelos filtros pré-pesados, foi secado e levado a uma estufa numa temperatura de 110 graus Celsius, por 24 horas, até ficar totalmente seco e depois colocado em um dessecador para esfriar por 20 minutos. Em seguida, foi pesado em balança analítica. Com a massa de concentração da membrana mais o sedimento, subtraído da massa da membrana, identificou-se o material em suspensão de cada amostra, por unidade de litro (g/L).

O estudo do regime hidrológico do rio Ivaí, no trecho inferior, foi feito com a análise dos dados das estações fluviométricas e pluviométricas de: Tapira Jusante e Novo Porto Taquara. A Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA, órgão do Governo Estadual do Paraná, cedeu dados de precipitação, cota, vazões: diários, mensais e anuais; além de dados sobre carga suspensa e fundo dessas estações, as quais se encontram mais próximas da área de estudo. Para auxiliar no cálculo da vazão e na leitura da cota, foi instalada, no trecho estudado, uma régua graduada para a leitura do nível d'água, nos dias de coleta.



Figura 6: Ecossonda e GPS acoplada a um computador portátil.



Figura 7: Molinete fluviométrico.



Figura 8: Amostrador de fundo tipo Van Veen.



Figura 9: Amostrador de carga suspensa (garrafa de Van Dorn).



Figura 10: Material coletado sendo filtrado à vácuo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

Segundo Christofolletti (1981), o canal fluvial é caracterizado pelos aspectos morfológicos (padrão, largura, profundidade, sinuosidade) e por sua descarga (períodos de cheia e vazante, tipo de carga sedimentar, tipo de fluxo). Os canais fluviais podem ser classificados de acordo com o tipo de fluxo: laminar ou turbulento, uniforme ou não-uniforme, estável ou instável. Para classificar o tipo de fluxo, os fatores que afetam a velocidade do fluido são: a profundidade da água, a viscosidade, a densidade do fluxo e a rugosidade da superfície do canal.

O fluxo laminar ocorre quando a água escoar ao longo de canal reto, suave, com baixas velocidades, fluindo em camadas paralelas, acomodadas umas sobre as outras. O fluxo turbulento é caracterizado por uma variedade de movimentos caóticos e heterogêneos, com muitas correntes secundárias contrárias ao fluxo principal para jusante (CHRISTOFOLETTI, op. cit).

Na distinção entre fluxos laminar ou turbulento, emprega-se o número de Reynolds (Rey) obtido por intermédio da equação 1. No seu cálculo, são utilizadas características do fluxo (velocidade, profundidade e largura) e propriedade do fluido (densidade e viscosidade). O raio hidráulico é calculado a partir da relação da área da seção transversal pelo perímetro molhado.

$$Rey = \frac{Q}{\pi .RH.Vcin} \quad 1$$

Sendo:

Q	vazão
$\pi$	pi
RH	raio hidráulico
Vcin	viscosidade cinemática

De acordo com o número de Reynolds, os limites para os fluxos são:

Rey < 500 = Fluxo laminar

Rey 500 – 2500 = Transição (ocorre tanto laminar como o turbulento)

Rey > 2500 = Fluxo turbulento

Outro parâmetro adimensional muito utilizado em estudos de canais é o número de Froude (F). Esse número é aplicado para classificar o regime de perturbação de onda nos escoamentos livres.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad 2$$

Sendo:

V	velocidade média
g	força da gravidade
D	profundidade média

Se o número de Froude (Equação 2) for menor que 1, o rio está no regime de fluxo fluvial ou subcrítico. Se o número de Froude for maior que 1, o rio está no regime de fluxo torrencial ou supercrítico, mas se o número de Froude for igual a 1, o rio possui um escoamento crítico (PORTO, 1999).

O fluxo pode ser caracterizado ainda como uniforme ou estável. Ele é considerado uniforme, quando a magnitude e a direção da velocidade não se modificam ao longo do comprimento do canal, conservando sempre a mesma profundidade. Quando ocorrem variações na velocidade e na profundidade ao longo do canal, o fluxo torna-se não-uniforme ou variável.

O fluxo é estável quando, em determinado ponto do canal, a profundidade não se modifica com o passar do tempo. Na dinâmica do escoamento há uma resistência ao fluxo que, para ser superada, o fluxo deve possuir uma velocidade crítica ( $V_c$ ), expressa pela equação:

$$V_c = \sqrt{g \cdot RH \cdot S} \quad 3$$

Sendo:

g	força da gravidade
RH	raio hidráulico
S	declividade

A carga transportada por um curso d'água, seja ela dissolvida, em suspensão ou de fundo; é produto de interações entre a massa líquida em movimento, a superfície do canal fluvial e os diferentes tipos de sedimentos transportados. São duas as forças principais que atuam sobre a dinâmica fluvial e o transporte de sedimentos: a força da gravidade e a Tensão de cisalhamento. A força da gravidade é a força vertical exercida pela massa líquida sobre o canal, e direciona o fluxo das áreas com maior declividade para as partes mais baixas. A Tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) por unidade de área é a força de atrito existente entre o líquido em movimento e o canal, implicando em uma resistência ao escoamento e ao transporte de sedimentos (Equação 4). A Tensão de cisalhamento é decisiva para iniciar o movimento de partículas pequenas, enquanto a velocidade do fluxo é mais importante para o carregamento das partículas maiores (CHRISTOFOLETTI, 1981).

$$\tau = \lambda. R. S \quad 4$$

Sendo:

$\lambda$	peso específico da água
R	raio hidráulico
S	declividade da linha da água

A energia total do canal ou stream power ( $\Omega$ ) e a energia do canal por unidade de largura ( $\Omega/L$  ou  $\omega$ ), equação 5 e 6, são variáveis importantes na hidráulica fluvial, pois representam o trabalho despendido ou a energia perdida pelo canal, devido ao regime de fluxo. Estas variáveis têm sido utilizadas na interpretação de processos erosivos, migração de canais, transporte e deposição de sedimentos, tipos de formas de leito, morfologia do canal e classificação rio-planície de inundação (NANSON e CROKE, 1992).

$$\Omega = \gamma. Q. S \quad 5$$

Sendo:

$\gamma$	massa específica (20° C)
Q	vazão
S	declividade

$$\omega = \frac{\Omega}{L}$$

6

Sendo:

$\Omega$	energia total
L	largura do canal

### 3.2 VELOCIDADE DO FLUXO, REMOÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Segundo Caldas (1972), a velocidade de decantação das partículas depende do seu tamanho, peso e forma. A argila assenta muito vagarosamente (leva cerca de 6 meses para atingir o fundo de um corpo d'água doce, parada, de 15 metros de espessura). A areia fina assentaria em cerca de uma hora, em idênticas condições. Nas águas movimentadas, a turbulência contribui para manter as partículas em suspensão por maior tempo. As águas que se movem lentamente fluem sob a forma de filetes lisos (corrente laminar); sob grandes velocidades, entretanto, o movimento torna-se irregular, gerando-se redemoinhos (corrente turbilhonar).

A compactação e a posterior consolidação dos sedimentos depositados no leito fluvial dificultam a remoção dos mesmos pelo fluxo. A compactação ocorre quando o sedimento passa por muito tempo sob a ação do peso da água e do seu próprio peso. Bordas e Semmelmann (1997) afirmam que o processo de consolidação dos sedimentos depositados no leito fluvial é promovido pelo acúmulo de partículas sobre o fundo e pela compactação do depósito resultante do efeito do próprio peso dos sedimentos, da pressão hidrostática ou de qualquer outro fenômeno que venha a aumentar a densidade dos depósitos.

Os processos fluviais de erosão, transporte e deposição de sedimentos são definidos pela distribuição da velocidade e da turbulência do fluxo, e estão em constante mudança (CUNHA E GUERRA, 1996).

Bagnold<sup>1</sup> (1953 apud CHRISTOFOLETTI, 1981), elaborou um gráfico significativo, utilizando a comparação da velocidade crítica e o diâmetro das partículas, obtendo algumas conclusões. Para as partículas menores de determinado tamanho crítico, os valores da velocidade necessária para o início do transporte aumentam à medida que as partículas tornam-se menores. Para a água, há relação inversa entre o tamanho das partículas inferiores a 0,3 mm e a velocidade crítica necessária à sua movimentação. A explicação baseia-se no fato de que, com as partículas mais finas, a rugosidade do leito torna-se menor, diminuindo a turbulência, e o diâmetro das partículas não ultrapassa a espessura da subcamada laminar. Para que haja inclusão no fluxo turbulento, há um tamanho crítico necessário, calculado como sendo aproximadamente 0,7 mm (CARSON<sup>2</sup>, 1971 apud CHRISTOFOLETTI, 1981). Para as partículas inferiores a esse valor-limite crítico, a força necessária para movimentá-las deve ser elevada, pois elas estão submersas na subcamada laminar. O efeito pelo qual o leito de silte e argila são mais difíceis de serem erodidos que os de areia recebem o nome de efeito ou anomalia Hjulstrom-Sundborg (GIANNINI et al., 2001).

Partículas de tamanhos iguais, mas com densidades diferentes, requerem velocidades e forças diferentes para serem movimentadas ou depositadas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Morisawa<sup>3</sup> (1968 apud op. cit) assinala dois aspectos importantes:

- Areias são erodidas mais facilmente, enquanto siltes, argilas e cascalhos são mais resistentes. Os grãos mais finos são resistentes em virtude das forças coesivas de ajustagem e da fraca rugosidade do leito, enquanto os cascalhos são difíceis de serem movimentados em virtude do tamanho e peso das partículas;
- Desde que os siltes e argilas sejam movimentados, essas partículas podem ser transportadas sob velocidades muito baixas.

A velocidade de deposição depende principalmente do tamanho e da densidade da partícula, porque os demais fatores (gravidade, viscosidade e densidade da água) são constantes para um determinado tempo e lugar no canal.

---

<sup>1</sup> BAGNOLD, Ralph A. The physics of blown sands and desert dunes. Methew e Co., Londres, 1953.

<sup>2</sup> CARSON, M. A. The mechanics of erosion. Pion Limited, Londres, 1971.

Quando a partícula é movimentada, há soerguimento em relação à superfície do leito e ela se incorpora ao fluxo do fluido. A força do soerguimento diminui rapidamente, desaparecendo quase por completo à distância de 2,5 cm do leito (CARSON<sup>4</sup>, 1971 apud CHRISTOFOLETTI, 1981). Havendo diminuição da força de soerguimento, se não houver força de turbulência suficiente para mantê-las suspensas e integradas no fluxo, as partículas tendem a se depositar e, ao atingirem as proximidades do fundo, novamente podem ser movimentadas pela força de soerguimento. Esse processo apresenta explicação lógica para a movimentação de partículas através da saltação ao longo do escoamento do fluido. Quando as forças de turbulência mantêm e conservam as partículas acima da superfície do leito, há o transporte através da suspensão.

Giannini (et al., 2001) verificou que, uma vez que a corrente colocou a partícula em movimento, diminuem drasticamente os efeitos de coesão e fricção sobre ela. Nessas condições, quanto menor a granulação do material, mais fácil é o seu transporte. Partículas de diferentes tamanhos podem apresentar velocidades e mecanismos de transporte individual diferentes. Os principais mecanismos são: a suspensão, a saltação, o arrasto e o rolamento.

A suspensão é o carreamento ou sustentação do grão acima da interface sedimento/fluido (superfície deposicional). Ela pode ocorrer por uma ou mais dentre três condições físicas: existência de turbulência, baixa densidade e comportamento coloidal. As duas últimas condições não requerem movimento, podendo ser observadas mesmo em fluidos estacionários. As forças que mantêm o grão em suspensão, em cada um destas situações, são, respectivamente, a força de ascensão hidráulica, o empuxo e a resultante do movimento browniano.

A saltação é a manutenção temporária do grão em suspensão, em trajetória aproximadamente elíptica, entre seu desprendimento inicial e o impacto na interface fluido/sedimento ou entre dois impactos sucessivos. Durante o choque, o grão pode afetar algumas partículas da interface e provocar ricochete, uma forma de saltação induzida pelo impacto. A saída de grãos por ricochete cria um pequeno déficit local, marcado por irregularidade no leito, e torna esta área mais exposta ao esforço tangencial e mais sujeita a novos lançamentos. Desse modo, o fenômeno da saltação possui a capacidade de se automultiplicar.

O arrasto ou rastejamento (creep) é o deslocamento do grão subparalelo e rente à interface sedimento/fluido, em contato duradouro ou tangencial com esta interface. A exemplo do que ocorre na saltação, o contato ou aproximação com a interface pode afetar outros grãos. O

---

<sup>3</sup> MORISAWA, M. Streams, their dynamics and morphology. McGraw – Hill Book Co., New York, 1968.

movimento induzido mais comum é um ligeiro remanejamento, através de empurrão dos grãos uns sobre os outros.

O rolamento é a rotação do grão em torno de um eixo, por sobre outros grãos da interface. É facilitado pelas formas esféricas e principalmente pelas cilindróides e pelo tamanho relativo do grão (maior que a média do substrato). O movimento dos grãos por arrasto e rolamento é denominado tração.

Fixada a energia de transporte, em um sedimento com certo intervalo de variação granulométrica, a população mais fina tende a ser transportada em suspensão, a mais grossa por tração e a intermediária por saltação. Fixada a granulação, a tração é o mecanismo de transporte preferencial nas baixas energias, passando-se, com o aumento gradual de energia, para saltação e depois suspensão.

O transporte e a dispersão de sedimentos em rios e canais ocorrem devido à ação das forças hidrodinâmicas instantâneas sobre os grãos de sedimentos individuais. Quando estas forças atingem valores superiores aos das forças de resistência, provenientes do contato da partícula com o leito e do próprio peso da partícula, ocorre o deslocamento do grão de sedimento (WILSON JÚNIOR et al., 1980).

O transporte dos sedimentos grosseiros ocorre no fundo da corrente. Dá-se o nome de carga à massa de detritos realmente transportada pelo rio. Normalmente a massa heterogênea de detritos não é transportada com uniformidade; as partículas menores movem-se mais rapidamente que as médias, e estas mais rapidamente do que as grandes. Opera-se, desse modo, uma seleção de que resultam depósitos de seixos, areia, argila e silte. A competência de uma corrente é definida em termos do tamanho das partículas que ela pode transportar. Já a capacidade se define em termos do peso total de detritos transportáveis. A primeira depende, sobretudo, da velocidade, enquanto a segunda é mais função do volume (CALDAS, 1972).

Em relação à fração particulada, a maior quantidade carregada durante um ano ocorre na época chuvosa, isto é, há normalmente distribuição sazonal irregular do transporte de sedimentos. Verifica-se que cerca de 70% a 90% de todo o sedimento transportado pelos cursos d'água ocorre no período de chuvas, principalmente durante as fortes precipitações, podendo chegar a 95% do total anual em apenas poucos dias (SILVA, et al. 2003).

---

<sup>4</sup> CARSON, M. A. The mechanics of erosion. Pion Limited, Londres, 1971.

De forma geral, nas porções altas de uma bacia hidrográfica há maior erosão e transporte de sedimentos. A erosão vai diminuindo da alta para a média bacia à medida que as declividades decrescem e as chuvas se tornam menos intensas, fora das regiões montanhosas. Na parte baixa da bacia há muita formação de colúvios, isto é, a maior parte dos sedimentos erodidos se distribui pelos terrenos (SILVA et al., 2003). Em relação ao transporte de sedimento do rio principal, a carga em suspensão é predominantemente maior que a do fundo (90% a 95%) no alto curso, e a carga de fundo vai crescendo à medida que a erosão da bacia vai diminuindo e a declividade do curso d'água também (65% a 90% de sedimento em suspensão). A porcentagem de sedimento em suspensão e do leito é muito dependente da granulometria do sedimento transportado. Assim, quando há grande quantidade de areia, a porcentagem de sedimento transportado no leito pode ser maior que o sedimento em suspensão (CARVALHO, 1994).

A dinâmica do escoamento fluvial fornece informações básicas para a compreensão das forças atuantes no funcionamento do processo morfogenético fluvial, em qualquer das fases tradicionalmente distinguidas no trabalho executado pelos rios, ou seja, transporte e erosão (CHRISTOFOLETTI, 1981).

O comportamento dinâmico do grão, isto é, sua velocidade, trajetória e modo de deslocamento, é uma resposta direta às forças nele atuantes e reflete suas características individuais como forma, densidade, tamanho e rugosidade superficial (GIANNINI et al., 2001). O instante do desprendimento do grão, bem como a distância por ele percorrida até atingir a posição estável seguinte não podem ser previstos, pois dependem das variações turbulentas das forças hidrodinâmicas e da posição da partícula no leito. Se o grão permanecer na superfície do leito, ele estará propenso a novo deslocamento. Caso seja enterrado, ele permanecerá em repouso, e só irá se deslocar depois de re-exposto, com o afastamento de todas as partículas que o cobrirem. Os depósitos podem ser considerados transitórios ou permanentes. Um depósito de sedimento permanente sofre a ação do peso da água e de seu próprio peso, compactando-se.

### 3.3 GEOMETRIA DAS FORMAS DE LEITO E QUANTIFICAÇÃO DA CARGA DE FUNDO

O valor da descarga de sólido total é importante nos estudos de navegação, de morfologia fluvial e formação de depósitos, estudos de construções de pontes, de obras fluviais em geral, como portos e tomadas d'água. O cálculo da carga de fundo de um canal pode ser

obtido pela determinação do tamanho das dunas, que permitirá o cálculo do volume do material e a sua velocidade de deslocamento a jusante.

O transporte dos sedimentos está intimamente relacionado à migração da configuração do leito, e, ambos resultam do movimento alternado das partículas isoladas. Como estas partículas depositam-se em lugares diferentes no leito, seus períodos de repouso serão diferentes e as velocidades de transporte também. A dispersão dos sedimentos deve-se às diferentes velocidades de transporte dos grãos isolados.

Prent et al. (2001) realizou um estudo que examinou o caráter estatístico das formas de leito, e sua correlação com a descarga e a resistência da corrente, concluindo que de um modo geral, a altura e o comprimento das dunas aumentam com a vazão e com a profundidade da água, mas permanece constante com o aumento da velocidade. Simons e Richardson (1966) afirmam que a mudança da declividade da superfície da água pode alterar a configuração do leito do canal quando a profundidade da água permanecer constante.

As formas de leito podem-se dividir em ripples, dunas, ondas, antidunas (Figura 11). As ondulas (“ripples”) de acordo com Santos (1991), são formas onduladas de pequena amplitude, de dimensões simétricas, com uma relação altura-comprimento de 1: 10 (HARMS et al., 1982). Apresentam suaves declividades nas faces à montante (“stoss side”) e fortes declividades nas faces à jusante (“lee side”). Ocorrem com amplo intervalo granulométrico desde silte até areia grossa, em baixa velocidade de fluxo. A Figura 11 mostra o intervalo de ocorrências das ondulas (“ripples”), obtidas a partir de experimentos em leitos artificiais; nesta vê-se que as ondulas têm sua principal ocorrência em sedimentos finos, menores do que 0,17 mm. À medida que aumenta o tamanho do grão, o intervalo de velocidade para a geração desta forma de leito diminui, explicando sua rara ocorrência em sedimentos arenosos grosseiros.

As dunas são formas assimétricas, com perfil longitudinal semelhante ao das ondulações, possuindo suave declividade para montante e declividade íngreme para jusante. A relação altura-comprimento é maior que as encontradas nas ondulações e o seu intervalo granulométrico é muito variado, de areia fina até areia grossa com pequenos seixos (SANTOS, 1991). Segundo Ashley et al. (1990), as grandes formas de leito têm sua presença e morfologia variável, segundo à força do fluxo, expressada pela velocidade média do fluxo e a velocidade crítica (isto é, o conceito do regime de fluxo). Para Christofolletti (1980) e Mazunber (2003), a amplitude máxima que possibilita o desenvolvimento das dunas é aproximadamente a

profundidade média. Sendo assim, as dunas desenvolvem-se proporcionalmente com o aumento da profundidade, até atingir os valores limites correspondentes à profundidade média. Sob condições de fluxo estável, a altura das dunas é diretamente proporcional à profundidade da água, sendo que a sua altura oscila entre 10 e 20% do valor da profundidade. Harms et al. (1982) afirma que as dunas podem crescer muito mais em fluxos profundos do que em fluxos rasos, mas seu comportamento hidráulico é similar: elas são formadas nas velocidades de fluxo maiores do que para as ondulações (“small ripples”) e menores do que para as formas planas (“plane bed”).

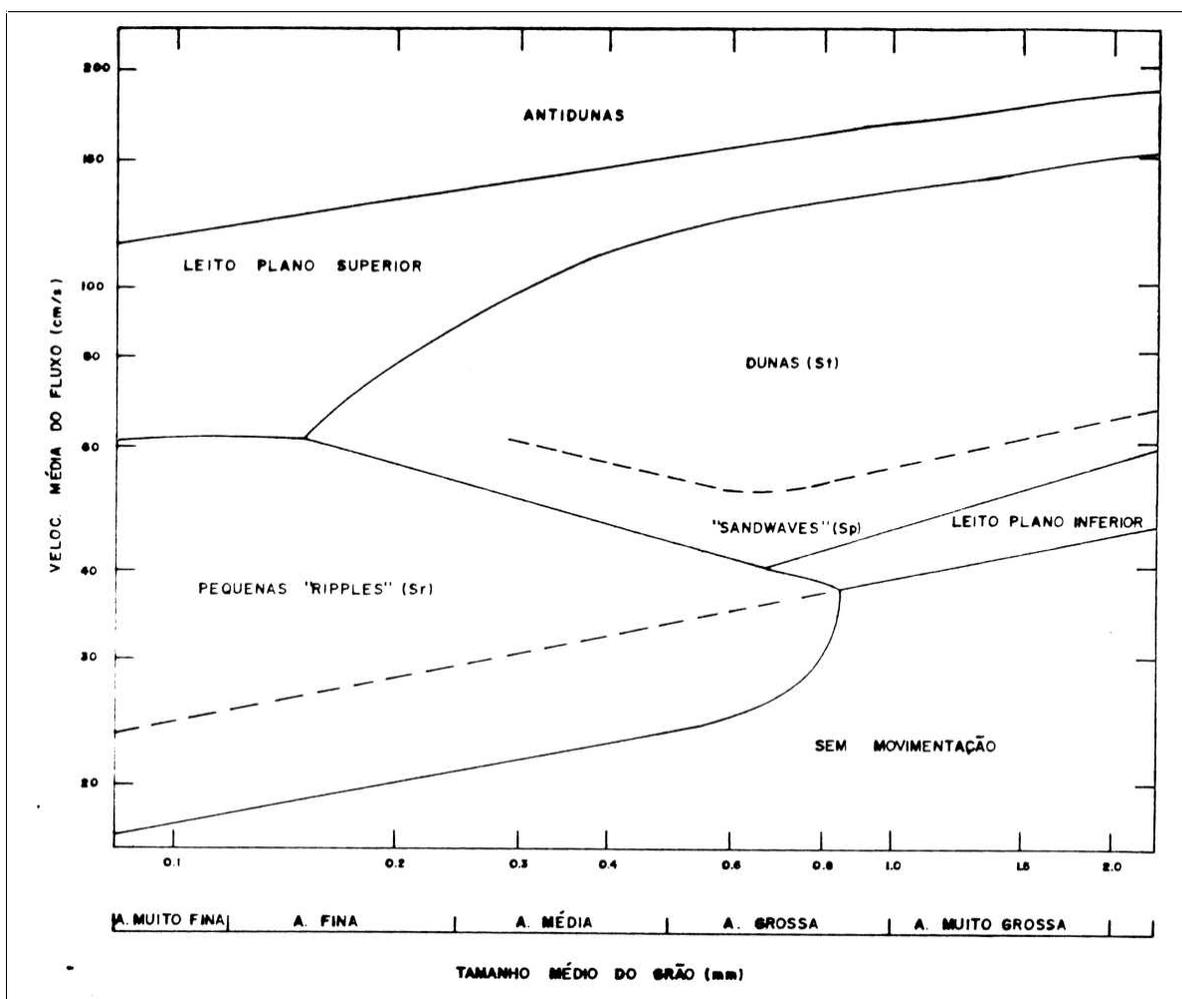


Figura 11: Distribuição das formas de leito frente a diferença granulométrica e velocidade média (cm/s).  
Fonte: HARMS et al., 1982.

O método, segundo Amsler e Prendes (2000), empregado para se avaliar o deslocamento de dunas permite medir indiretamente a carga de fundo. O cálculo da carga de fundo ( $C_f$ ) é obtido pela determinação da altura das dunas e da sua velocidade de deslocamento ao longo de

um perfil longitudinal. Partindo do pressuposto que as dunas naturais não apresentam uma forma triangular exata, caracterizando-se por ter a face de montante mais estendida e com declividade mais suave e a face de jusante mais abrupta e com maior declividade (Figura 12), para calcular a altura e comprimento delas, adotou-se um coeficiente de forma a fim de minimizar os erros advindos desta variável no cálculo da carga de fundo (MARTINS, 2004).

Primeiramente é feita uma caracterização individual das dunas de cada perfil, onde são levantados a altura, o comprimento e a profundidade. Como foram realizados levantamentos sucessivos de ecobatimetria, com um intervalo de tempo predeterminado, os perfis obtidos das duas séries de levantamento são comparados e cada duna é visualmente identificada (Figura 12).

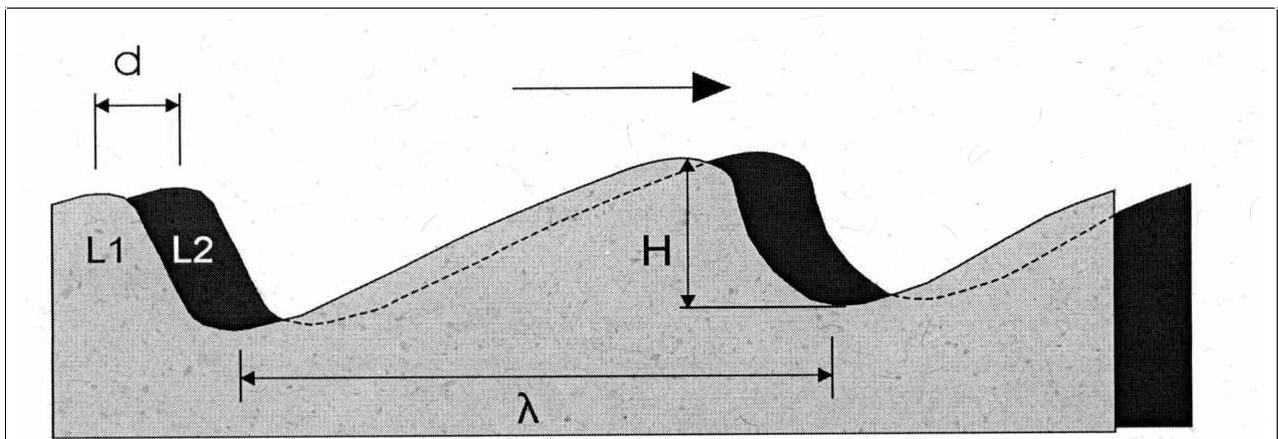


Figura 12: Modelo de representação para o cálculo do deslocamento de dunas. Fonte: MARTINS, 2004.

As dunas são combinadas em um mesmo gráfico, para o cálculo do deslocamento delas. O comprimento foi medido entre dois vales consecutivos e a altura foi determinada a partir da diferença entre a crista da duna e o vale a jusante (Figura 12). O cálculo do deslocamento das dunas ( $d_i$ ) é dado pela diferença entre a crista da duna nos dois levantamentos consecutivos. A velocidade de deslocamento ( $u_{di}$ ) das dunas é dada por:

$$u_{di} = \frac{d_i}{\Delta t}$$

7

Sendo:

udi	velocidade de deslocamento da duna
di	deslocamento da duna
$\Delta t$	tempo entre dois levantamentos sucessivos

A altura média de cada duna é dada pela equação 8:

$$h_i = \frac{h_{iL1} + h_{iL2}}{2} \quad 8$$

Sendo:

$h_i$	altura média da duna
$h_{iL1}$	altura média da duna no 1º levantamento
$h_{iL2}$	altura média da duna no 2º levantamento

A carga de fundo de um perfil é expressa pela equação:

$$C_f = (1 - p) \cdot H \cdot K \cdot u_d \quad 9$$

Sendo:

$C_f$	carga de fundo
$P$	porosidade do material de fundo
$H$	altura média das dunas
$K$	coeficiente de formas das dunas
$U_d$	velocidade de deslocamento das dunas

Por fim, a descarga total dada em unidade de largura é feita pela equação:

$$C_{f_{total}} = (C_{fP1} \cdot W_{P1}) + (C_{fP2} \cdot W_{P2}) + \dots + (C_{fPn} \cdot W_{Pn}) \quad 10$$

Sendo:

$C_{f_{Pn}}$	carga de fundo calculada para cada perfil
$W_{Pn}$	largura de abrangência de cada perfil

O valor de carga de fundo para cada perfil será dado em  $m^2/dia$  que estendida para a largura de abrangência do perfil pode ser expressa em  $m^3/dia$ . Alguns pesquisadores (Amsler e Gaudin, 1994; Martins, 2004; Strasser, 2002) vêm aplicando essa metodologia em rios de grande porte, como o rio Paraná e o Amazonas, os quais apresentaram resultados satisfatórios.

### 3.4 CARGA SUSPensa HIDROTRANSPORTADA E PROBLEMAS AMBIENTAIS

A carga de sedimentos em suspensão é representada pelas partículas de silte e argila que se conservam em suspensão no fluxo da água. O transporte sólido em suspensão consiste no material particulado originado da erosão da superfície do solo da bacia hidrográfica, do desbarrancamento de margens e da ressuspensão de material de fundo (GASTALDINI e MENDONÇA, 2001).

Os processos erosivos e a sedimentação numa bacia hidrográfica podem trazer muitos problemas. Na área agrícola a erosão remove a camada superficial do solo, reduzindo sua produtividade. O sedimento é transportado para os corpos d'água, prejudicando a qualidade das águas superficiais, além de servir como veículo a outros poluentes.

O transporte de sedimentos pelos rios afeta a qualidade da água e, conseqüentemente, a aceitabilidade desta para diversos usos antrópicos. O sedimento depositado em rios reduz a capacidade de suporte dos mesmos, resultando no aumento do nível da água nos períodos de cheia e em possíveis inundações nas áreas ribeirinhas. Outro grave problema, ocasionado pelos sedimentos refere-se ao assoreamento das nascentes de rios, reduzindo a disponibilidade hídrica dos mesmos.

Existem alguns problemas causados pelo transporte de sedimentos, como traz Carvalho (1994): a partícula em suspensão degrada o uso consumptivo da água, aumentando o custo de tratamento; o sedimento degrada a água especificamente para abastecimento, recreação, consumo industrial, resfriamento em hidroelétricas e vida aquática; o aumento de turbidez na água reduz a qualidade estética da mesma; o sedimento em suspensão impede a penetração de luz e calor, prejudicando a atividade de fotossíntese necessária à salubridade dos corpos d'água, entre outros.

O transporte sólido em suspensão ocorre em duas modalidades, segundo Ramos (2001), uma correspondente à carga de lavagem da bacia e outra correspondente ao transporte do material que compõem o material do leito. Para que este tipo de material se mantenha em suspensão é necessário que haja um nível elevado de turbulência do escoamento.

O tipo e concentração de matéria em suspensão controlam a turbidez e a transparência da água. Os sedimentos em suspensão são constituídos de silte, argila, partículas finas de matéria orgânica, compostos orgânicos solúveis, plâncton e outros organismos microscópicos. Tais partículas apresentam diâmetros variando entre 10nm e 0,1 mm (GASTALDINI e MENDONÇA, 2001). Atualmente, é comum a aceitação como matéria em suspensão a fração que não passa por filtro com diâmetro de poro 0,45  $\mu\text{m}$ . A turbidez resulta do espalhamento e absorção da luz incidente por partículas, enquanto que a transparência é o limite de visibilidade na água.

## 4 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS E SEDIMENTARES

### 4.1 PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

Aplicando-se a equações (1 a 6, descritas no capítulo 3) para o rio Ivaí (em sua foz) obtêm-se as seguintes características:

- 1) O fluxo é turbulento ( $Rey = 67.050.000$ ) e tranqüilo ( $Froude = 0,042$ ).
- 2) Possui um escoamento ou regime não permanente, pois a velocidade em um certo ponto varia com o passar do tempo. Não existindo uma continuidade de vazão e as características do escoamento dependem, por sua vez, das coordenadas do ponto considerado e do tempo (PORTO, 2001). Podendo ter a sua velocidade alterada em função do ciclo hidrológico do rio.
- 3) No rio Ivaí, na foz com o rio Paraná, obteve-se uma tensão de cisalhamento de  $0,85 \text{ N/m}^2$ , e uma velocidade crítica, que é a velocidade mínima para que haja um movimento de massa ou fundo, de  $0,029 \text{ m/s}$ . Quanto mais grossa a granulação de um leito sedimentar incosolidado, maior a velocidade mínima necessária para dar início ao movimento dos grãos, ou seja, a velocidade crítica.
- 4) A energia total do canal foi de  $180,25 \text{ W/m}$  e a energia específica foi de  $0,556 \text{ W/m}^2$ , comparando essa energia perdida pelo canal devido ao regime do fluxo com a do rio Paraná, temos  $17.460 \text{ W/m}$  de energia total e  $14,24 \text{ W/m}^2$  de energia específica. Portanto, o rio Ivaí, neste trecho, mostra uma energia total de  $96,8$  e uma energia específica de  $25,6$  vezes menor do que a do Paraná.

### 4.2 VELOCIDADE MÉDIA DO FLUXO

O rio Ivaí, no trecho estudado, não apresentou grandes amplitudes de velocidade ao longo da seção transversal, mas variou no perfil longitudinal (de montante para jusante), podendo ser observado pela Figura 13, a velocidade média na vertical variou de  $0,74 \text{ m/s}$  (07/06/04) a  $0,12 \text{ m/s}$  (28/09/04). Em geral, as maiores velocidades encontradas se localizam próximas à margem esquerda do rio Ivaí, nos pontos 3 e 4 a montante dos perfis longitudinais, porém o ponto 2B registrou velocidades altas nos dias 05/12/03 e 26/11/04 em relação aos demais pontos. As menores velocidades são limitadas nos pontos mais a jusante dos perfis 1 e 4. As maiores profundidades (Figura 14) são encontradas nos perfis 1 e 2 e ao longo do perfil 4 (margem

esquerda) estão as menores profundidades (pontos 4A e 4D), que variaram de 8,1 m (07/06/04) a 3,4 m (05/12/03). Pode-se observar que, os valores de profundidade e a velocidade média do fluxo possuem uma relação inversa, ou seja, nas menores profundidades é que se encontram as maiores velocidades (margem esquerda).

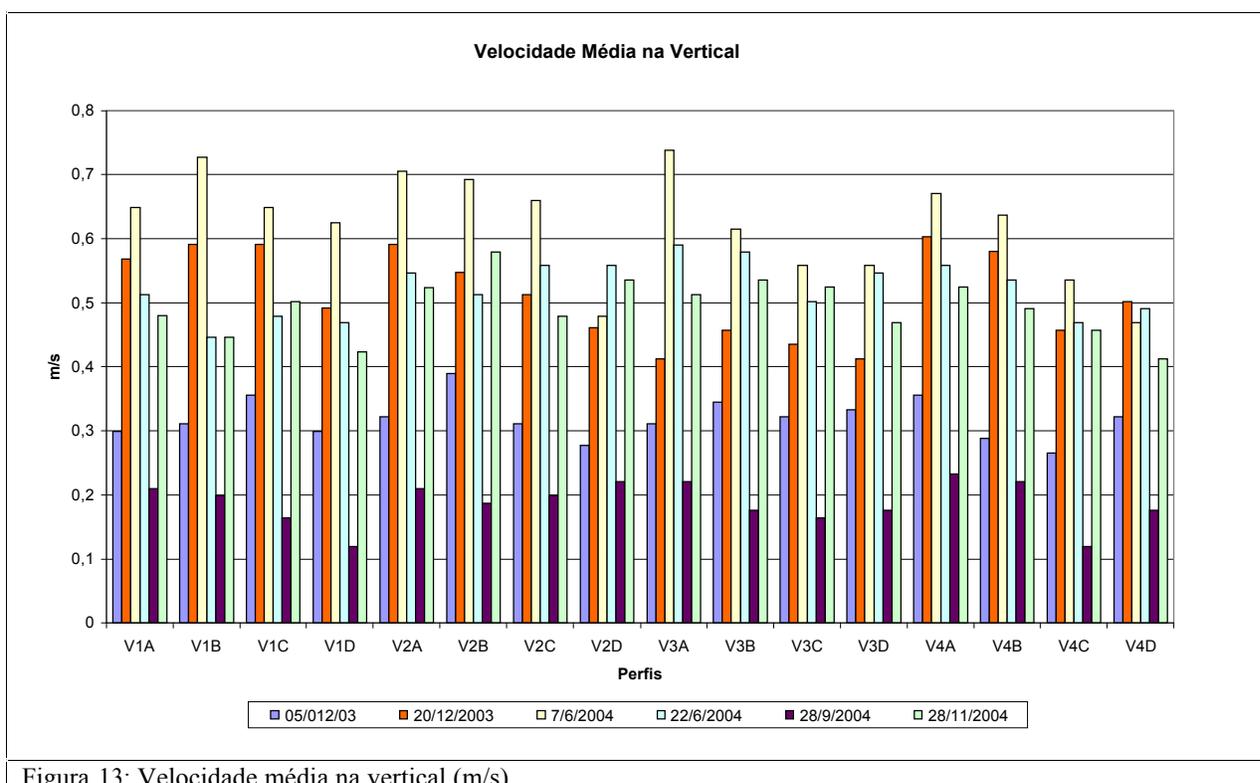


Figura 13: Velocidade média na vertical (m/s).

A diminuição da velocidade a jusante pode ser explicada, porque os pontos mais a jusante de cada perfil estão localizados próximos a foz com o rio Paraná e este último barra o fluxo do rio Ivaí diminuindo a sua velocidade.

Segundo Ashley e Chairperson (1990), a ampla variedade das formas de leito é um reflexo dos efeitos como a canalização (produzindo um efeito de barreira), mudanças do nível d'água e a oscilação dos reversos dos fluxos. O barramento do fluxo do rio Ivaí pelo rio Paraná facilita a decantação das partículas suspensas aumentando desta forma, os depósitos sedimentares. Constata-se também o inverso, no mês de outubro, quando a vazão do rio Ivaí era maior que a do rio Paraná, represando as águas deste último rio.

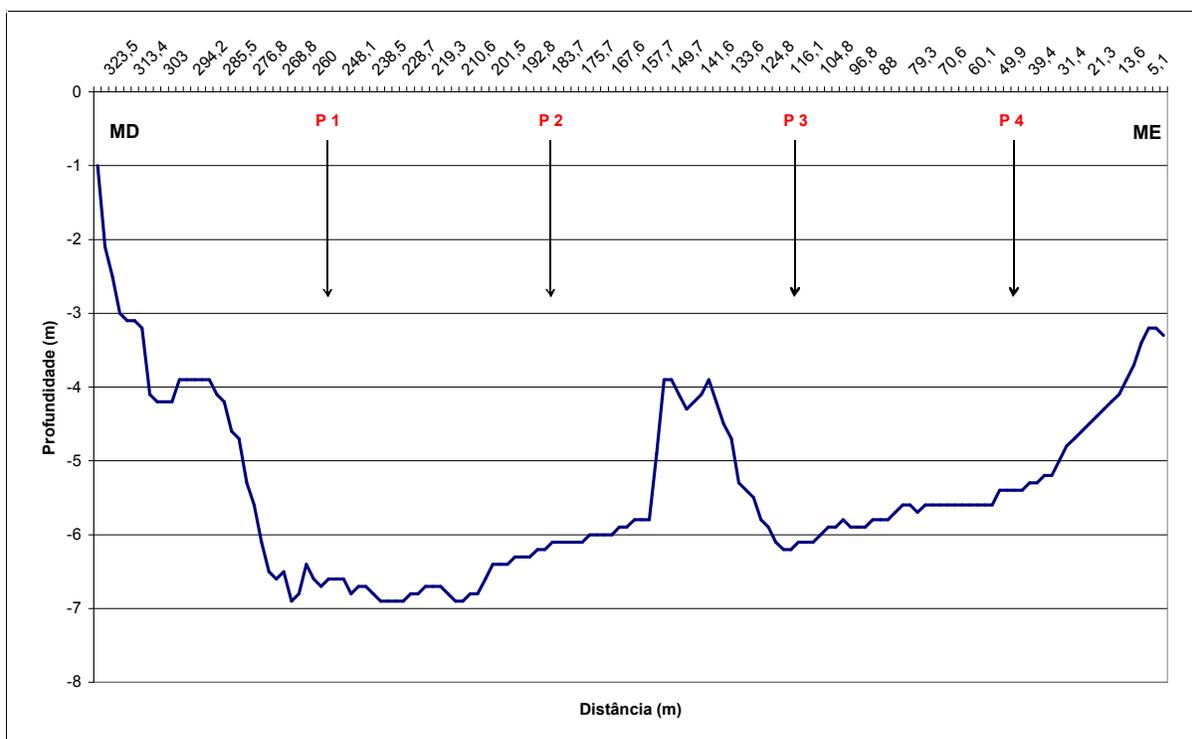


Figura 14: Perfil transversal da primeira seção com os pontos de coleta.

### 4.3 REGIME HIDROLÓGICO DO RIO IVAÍ

Para o estudo do regime hidrológico do segmento inferior do rio Ivaí, foram utilizados os dados de vazão de séries históricas da estação fluviométrica disponível mais próxima da área de estudo (Tabela 2).

Tabela 2: Estação fluviométrica e séries históricas

	Novo Porto Taquara
Código da estação	64693000
Coordenada geográfica	23°12'00" – 53°19'00"
Altitude	240 m
Data de início e término da série	08/1974 – 10/2002 (28 anos de dados)

Fonte: ANA, 2004.

Mudanças na descarga através do tempo são representadas por um hidrograma que é uma das primeiras representações que pode ser realizada sobre os dados fluviométricos existentes. Através deste, tem-se uma noção da variabilidade temporal das descargas anuais, das estações secas e úmidas como também de outras informações.

A determinação da curva de duração do fluxo é baseada na frequência das vazões para as diferentes magnitudes. Os resultados obtidos indicam a porcentagem de tempo em que as magnitudes das vazões são igualadas ou ultrapassadas, mostrando a duração do referido fluxo (CHRISTOFOLLETTI, 1981).

O período de retorno ( $T_r$ ) é obtido a partir dos dados de vazão máxima anual. Tais dados são ordenados conforme a seqüência da magnitude, dos valores mais elevados para os menores. A cada valor deve corresponder um número de ordem que apresenta a sua posição na escala, a esses dados são aplicados ao método probabilístico de Gumbel.

#### 4.3.1 Hidrograma

As vazões em um canal variam no tempo e no espaço. Em ambientes com uma definida variação estacional, o fluxo no canal pode mudar bastante através do ano com marcados picos de estiagem e cheias (SILVA, 2002). A análise do hidrograma das vazões médias mensais das estações Novo Porto Taquara, mostra que as mesmas são aleatórias. Pois dependem de um grande número de fatores, tais como precipitação, geologia, vegetação, topografia, e do projeto de obras hidráulicas. A vazão máxima e o hidrograma são necessários para o controle e atenuação das cheias numa determinada área, dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem urbana, perímetro de irrigação, diques e extravasadores de barragens, entre outros (TUCCI, 1997).

O hidrograma permite visualizar com facilidade a extensão e distribuição dos períodos extremos de vazão, estiagens e enchentes, em ordem cronológica precipitação antecedente, temperatura, estação do ano, obras nos cursos d'água, etc. Os pesos diferenciados com que esses fatores entram para formar o escoamento superficial, juntamente com a contribuição subterrânea, geram vazões diferentes. É notório que a precipitação e os fatores geológicos entram com o maior peso (VILLELA e MATTOS, 1975).

A vazão máxima de um rio é entendida como sendo o valor associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado. Essa vazão é utilizada na previsão de enchentes ao longo do período de

observação (PINTO et al., 1976). A vazão média para a estação Novo Porto Taquara, é de 727,73 m<sup>3</sup>/s, obtida pela análise de sua série histórica de 28 anos de observação.

O hidrograma (Figura 15) mostra que os maiores picos de vazões máximas do segmento inferior do rio Ivaí, para a Estação do Novo Porto Taquara, aconteceram nos anos de 1976 (4.972 m<sup>3</sup>/s), 1983 (5.747 m<sup>3</sup>/s), 1987 (5.124 m<sup>3</sup>/s), 1990 (5.164 m<sup>3</sup>/s) e 1993 (4.947 m<sup>3</sup>/s). Além disso, a Figura 15, revela que depois do ano de 1994 as vazões apresentaram picos de cheias menores que os anos anteriores.

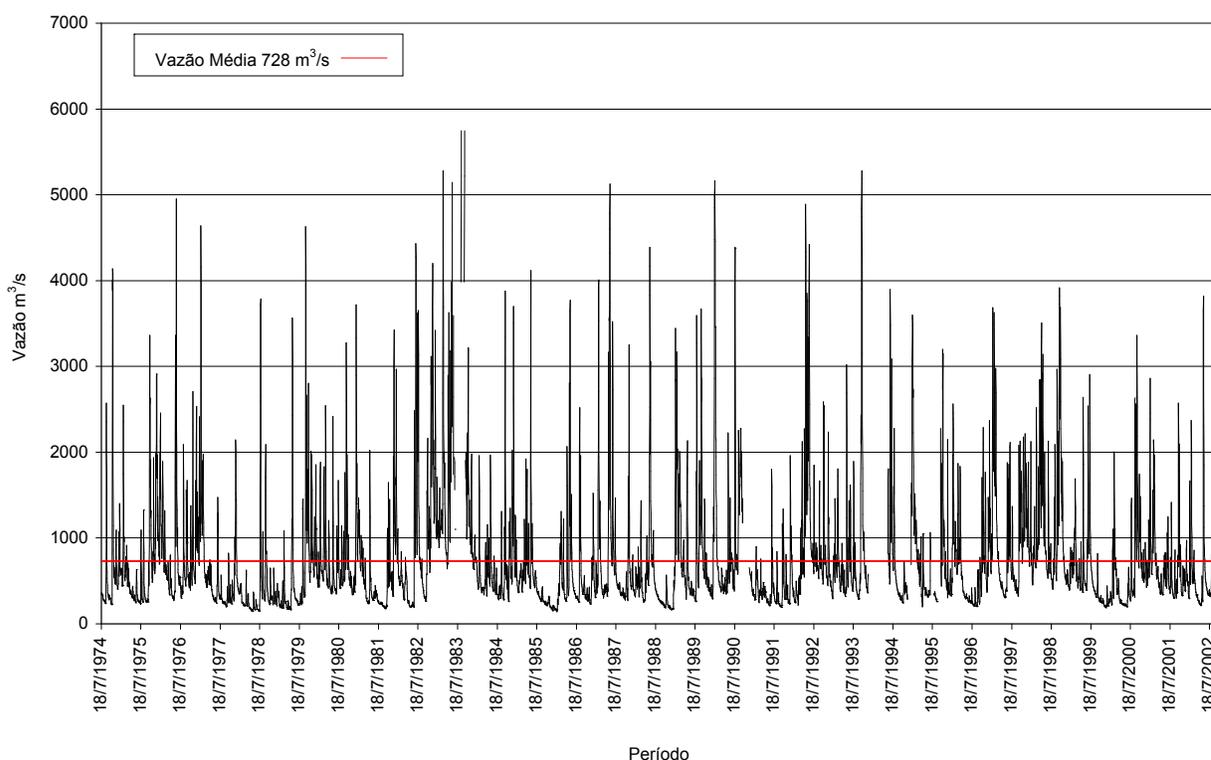


Figura 15: Hidrograma da vazão média diária para a Estação Novo Porto Taquara. Fonte: Destefani, 2005.

### 4.3.2 Curva de Duração das Vazões

Dá-se o nome de curva de duração ou de permanência das vazões à representação gráfica da função da vazão pelo tempo ( $Q(t)$ ), sendo a duração normalmente expressa em porcentagem. Como cada dado de vazão corresponde a um intervalo de tempo (hora, dia, mês, ano) há uma correspondência entre aquela porcentagem e o período total dos dados (VILLELA et al., 1975). Como é uma curva acumulativa de freqüência dos dados, a curva de permanência indica a porcentagem de tempo que um determinado valor de vazão foi igualado ou excedido

durante o período estudado. Para facilitar a utilização dos dados, o somatório das frequências é geralmente expresso em termos de porcentagem de tempo, em vez de números de dias (SILVA, 2002).

Para o traçado da curva de permanência, primeiramente se ordena a variável temporal em ordem decrescente, atribuindo ordem 1 ao maior valor e ordem n ao menor. Depois se computa a frequência com que cada valor ordenado é excedido ou igualado (permanência), como  $100 \cdot (m/n)$ , sendo m sua ordem e n o tamanho da amostra. E por último, plota-se em um gráfico a série ordenada em papel decimal com escala de permanência representada no eixo horizontal (LANNA, 1997).

As vazões apresentadas pela Estação Novo Porto Taquara (Figura 16) durante 28 anos de registro (1974 – 2002) mostram que as mesmas durante 1,05% dos dias foram maiores ou iguais a vazão máxima média do rio ( $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A curva de duração das descargas mostra que praticamente 100% do tempo a vazão é igual ou superior a  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , ficando acima da vazão média do rio.

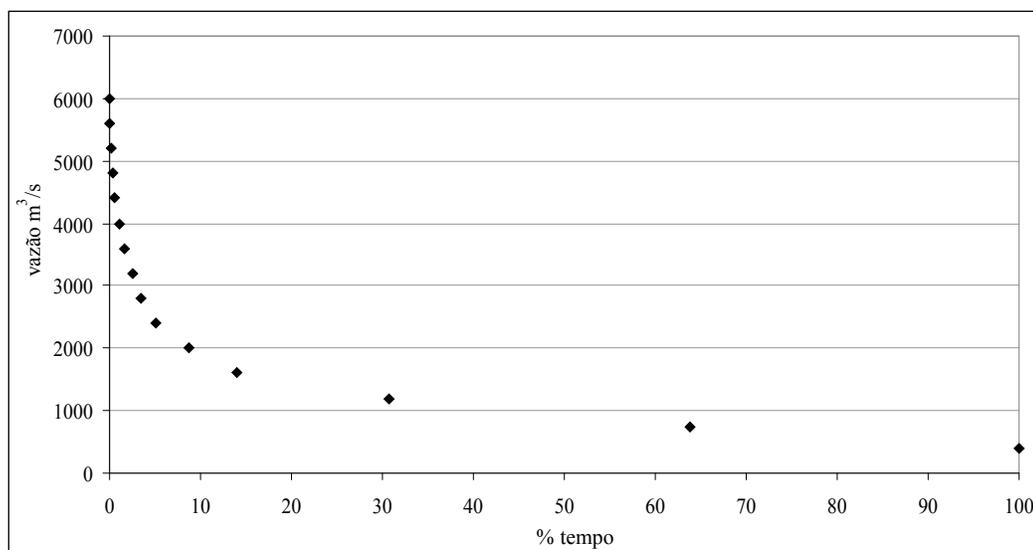


Figura 16: Curva de duração do fluxo. Fonte: Destefani, 2005.

### 4.3.3 Período de Retorno das Vazões Máximas

Utilizando-se os dados das maiores descargas anuais (vazões máximas anuais) ocorridas na estação Novo Porto Taquara, pode-se verificar a periodicidade, ou seja, o período de retorno

das vazões máximas do rio através de uma curva de frequência. As vazões devem reproduzir condições críticas possíveis de ocorrer com um determinado risco. O risco é a probabilidade que um valor seja ultrapassado. Este risco é obtido pelo ajuste de uma distribuição de probabilidade aos valores anuais da variável em estudo (a vazão). Neste caso, a probabilidade (P) é o risco da vazão ser ultrapassada num ano qualquer (TUCCI, 1997). O tempo de retorno deste valor é dado por:

$$T = \frac{1}{P}$$

O período de retorno ou período de recorrência de uma vazão é o tempo médio em anos que essa vazão é igualada ou superada pelo menos uma vez. Portanto, estima a probabilidade de ocorrer enchentes ou altos picos de vazão pelo menos uma vez dentro deste intervalo de tempo.

Para Novo Porto Taquara a maior cheia verificada (Figura 17), para o período de análise de sua série histórica, apresenta uma vazão de 5.747 m<sup>3</sup>/s correspondendo a um aumento do nível d'água de 1158 cm, acima da cota da vazão média do rio. Para este, o intervalo de recorrência é de 22,75 anos. Nesta estação, pelo menos a cada 2,61 dos anos, o rio apresenta uma vazão de 4121 m<sup>3</sup>/s, superior a vazão média das máximas (4019,58 m<sup>3</sup>/s). A vazão média das mínimas (244,69 m<sup>3</sup>/s) é superada praticamente em todos os anos.

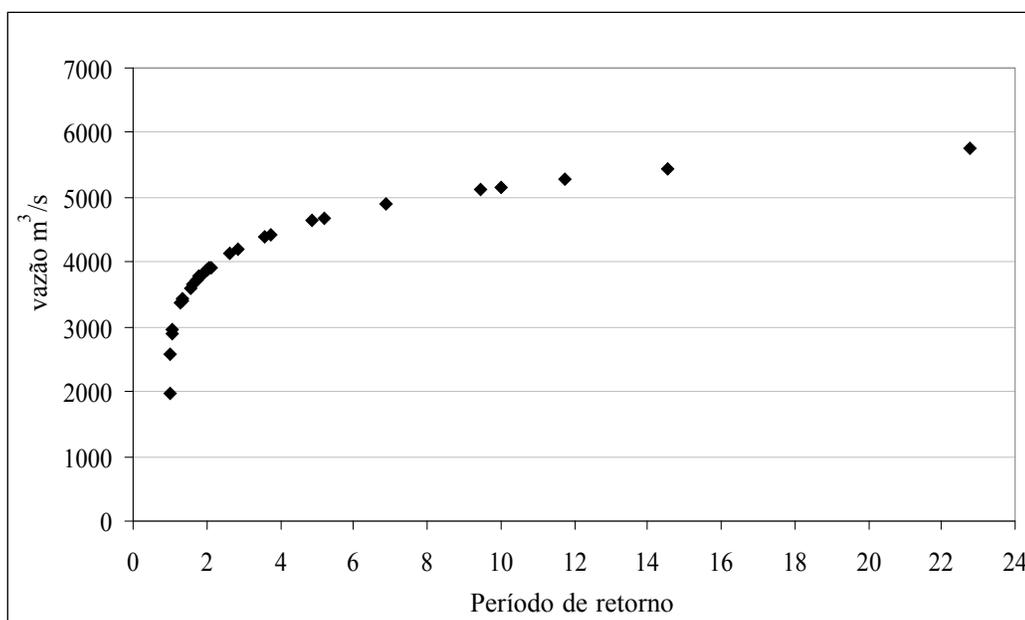


Figura 17: Período de retorno para a Estação Novo Porto Taquara. Fonte: Destefani, 2005.

#### 4.4 CARGA SEDIMENTAR E FORMAS DE LEITO

Para o cálculo da descarga sedimentar do canal do rio Ivaí, na área de estudo, uma grande dificuldade encontrada foi na determinação da velocidade de deslocamento das formas de leito e na própria identificação das dunas (comparação entre os dois levantamentos de cada campanha), pois o rio Ivaí, neste trecho, apresenta formas muito pequenas. Diferente do que ocorre no rio Paraná, onde esta metodologia é aplicada há mais de 10 anos por vários autores em dunas com dimensões maiores, o que facilita a identificação e o monitoramento das mesmas.

Campanhas	Período de Coleta	Vazão	Cota
1ª Campanha (vazante)	05/12/03 – 20/12/03	431,53 m <sup>3</sup> /s – 664,4 m <sup>3</sup> /s	0,40 m
2ª Campanha (cheia)	07/06/04 – 22/06/04	988,86 m <sup>3</sup> /s – 777,6 m <sup>3</sup> /s	0,72 m – 0,39 m
3ª Campanha (estiagem/ cheia)	28/09/04 – 29/10/04	273,82 m <sup>3</sup> /s – 2162,97 m <sup>3</sup> /s estiagem                      cheia	0,20 m – 1,30 m
4ª Campanha (vazante)	26/11/04 – 28/11/04	678,2 m <sup>3</sup> /s	0,50 m – 0,55 m

Quadro 2 – Período de campanhas de amostragem, mostrando a vazão para o trecho de estudo e a cota do nível d'água em Icaraíma nos dias de coleta.

As Figuras 18 a 26 representam a variação longitudinal das formas de leito ao longo dos perfis longitudinais, o quadro menor inserido dentro do gráfico, mostra o perfil ecobatimétrico georreferenciado das duas campanhas consecutivas e o maior representa os mapas batimétricos, obtidos nas campanhas descritos no Quadro 2. Os dados dos perfis ecobatimétricos da primeira campanha foram excluídos, pois na primeira coleta da mesma, não havia sido instalada uma régua para registrar o nível d'água.

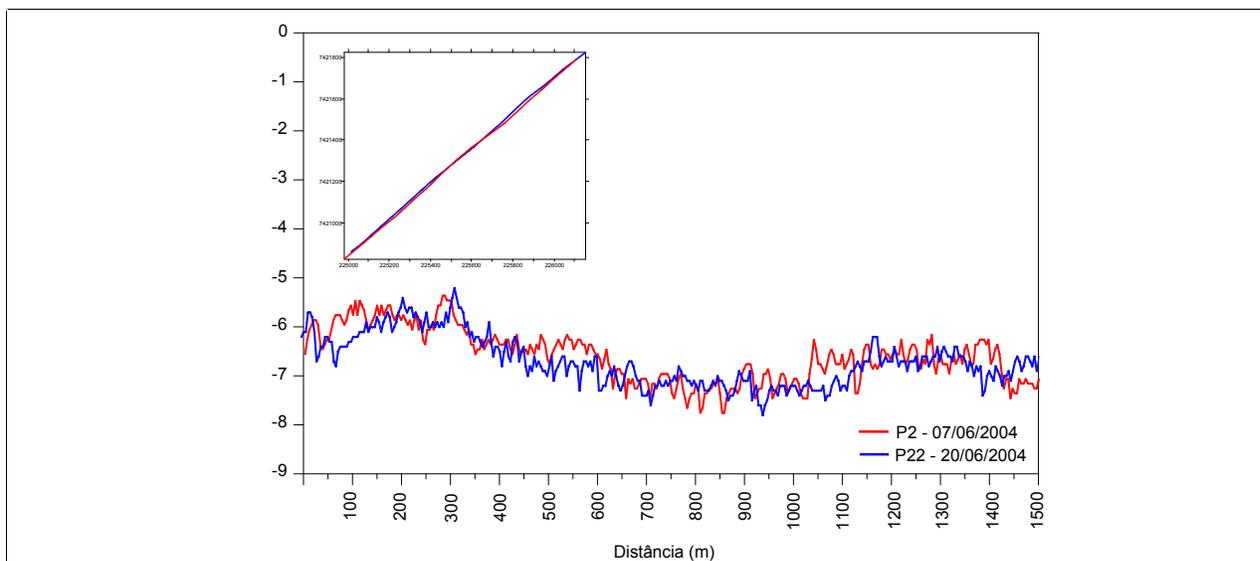


Figura 18: Perfil longitudinal do rio Ivaí, segunda campanha (perfil 2).

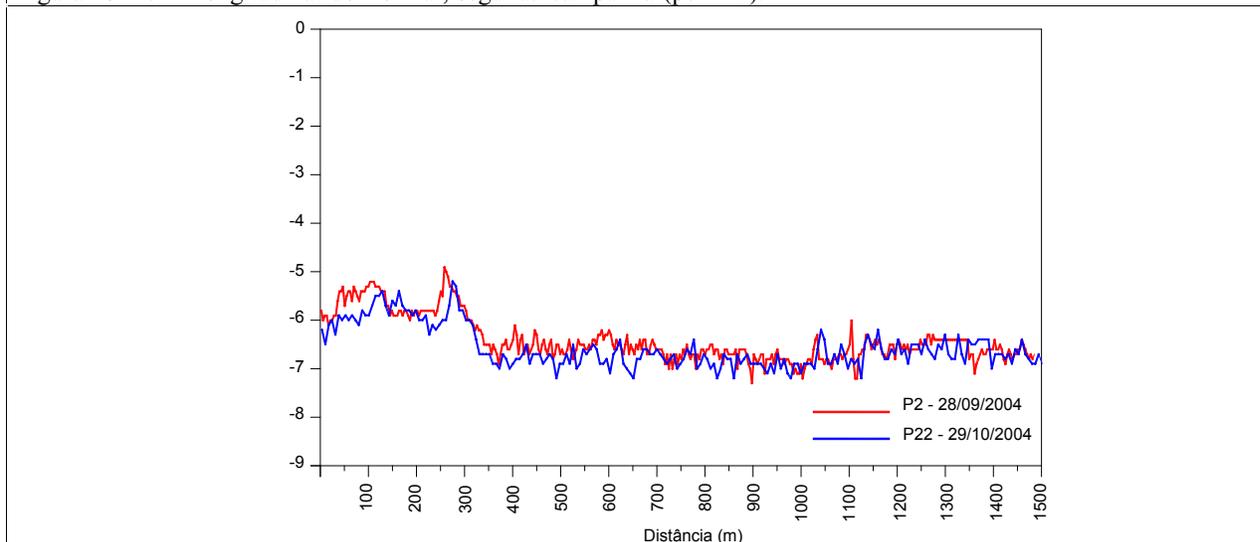


Figura 19: Perfil longitudinal do rio Ivaí, terceira campanha (perfil 2).

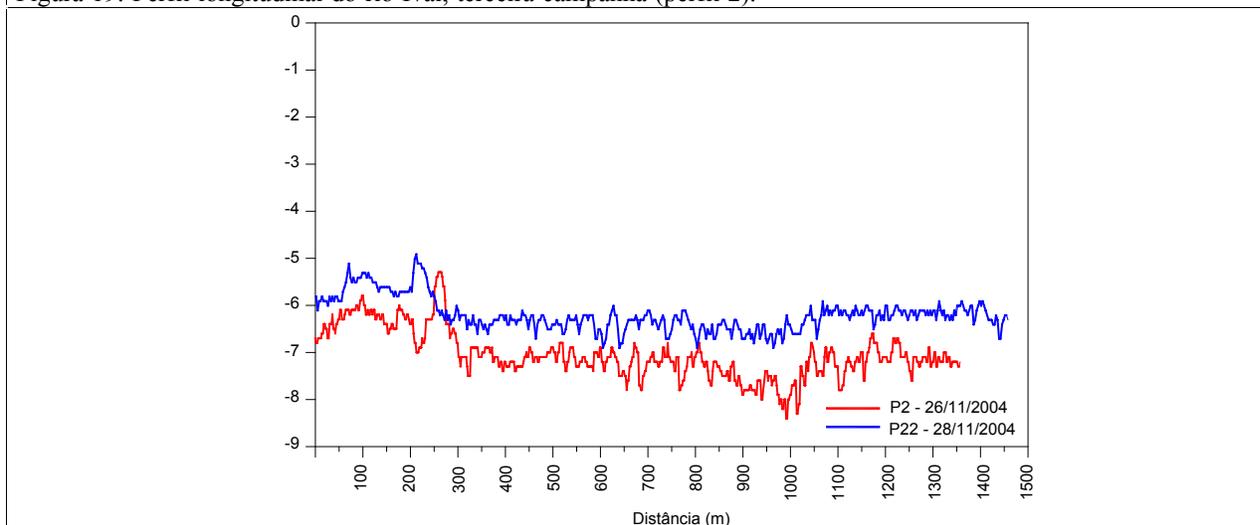


Figura 20: Perfil longitudinal do rio Ivaí, quarta campanha (perfil 2).

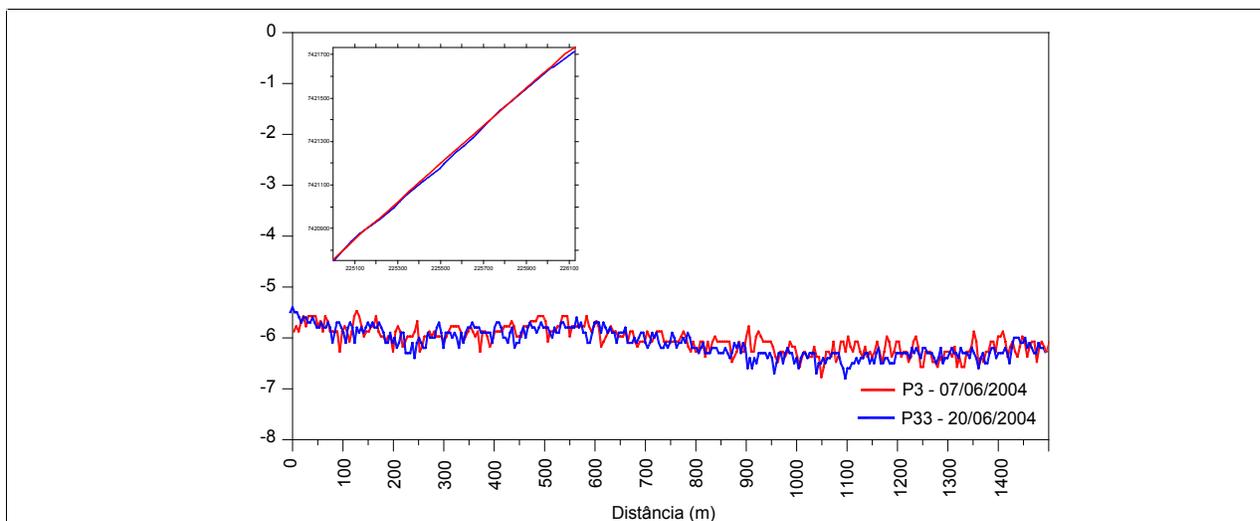


Figura 21: Perfil longitudinal do rio Ivaí, segunda campanha (perfil 3).

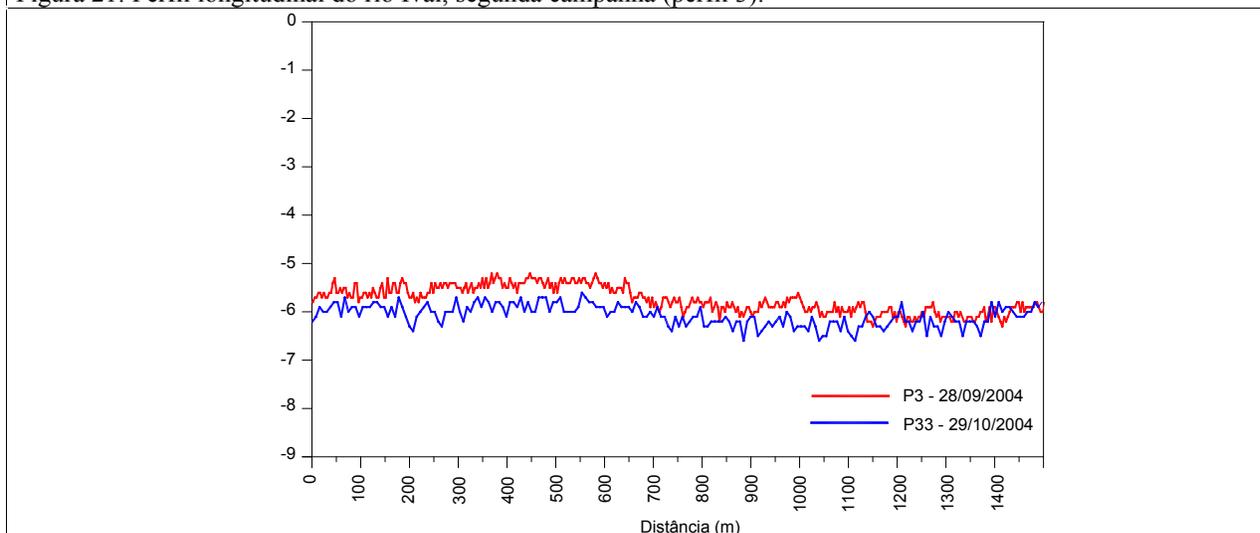


Figura 22: Perfil longitudinal do rio Ivaí, terceira campanha (perfil 3).

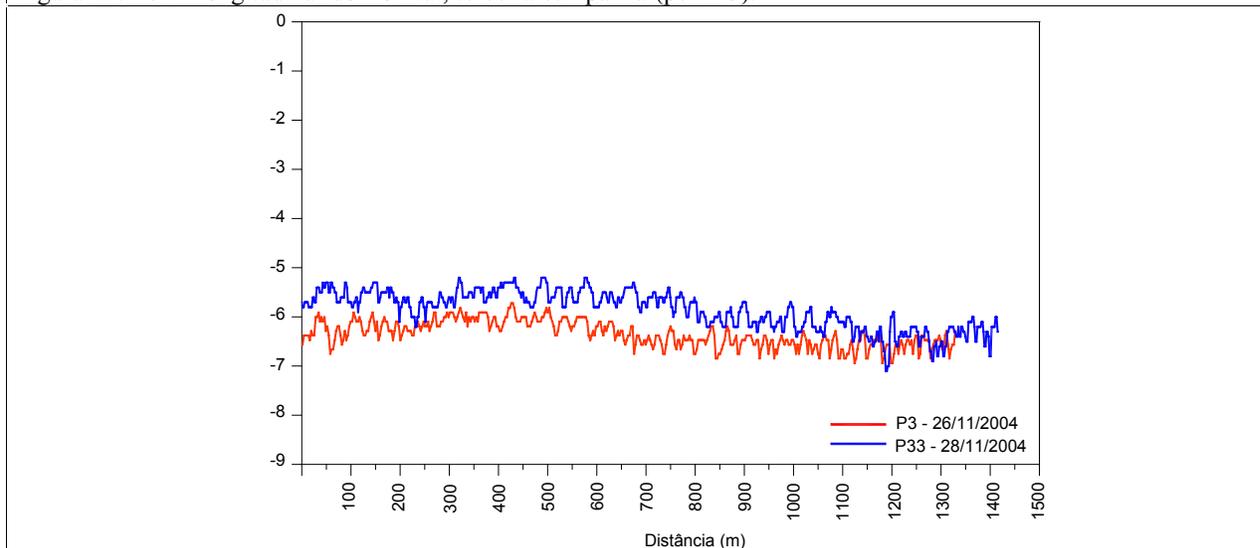


Figura 23: Perfil longitudinal do rio Ivaí, quarta campanha (perfil 3).

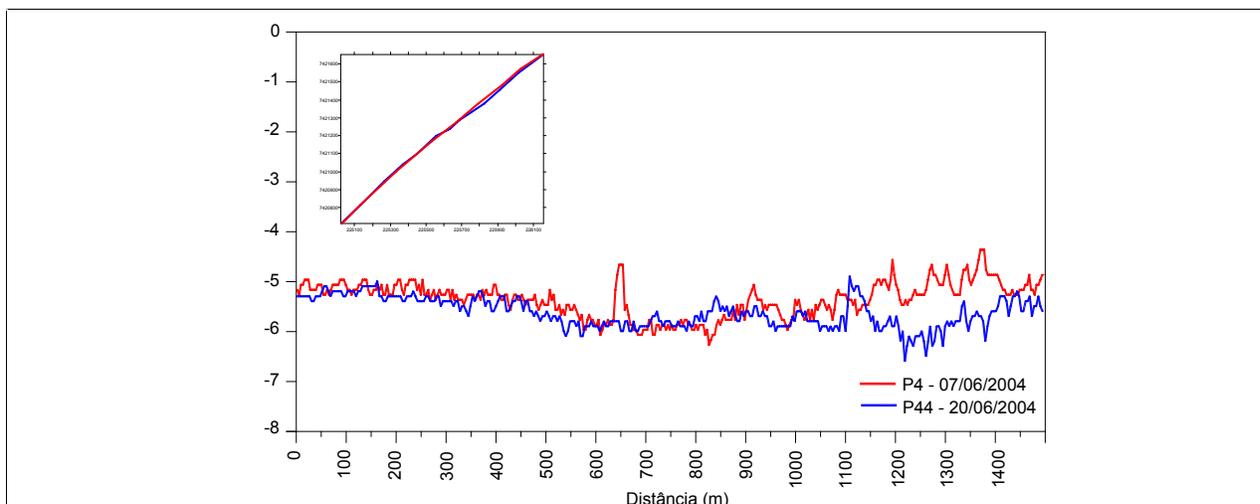


Figura 24: Perfil longitudinal do rio Ivaí, segunda campanha (perfil 4).

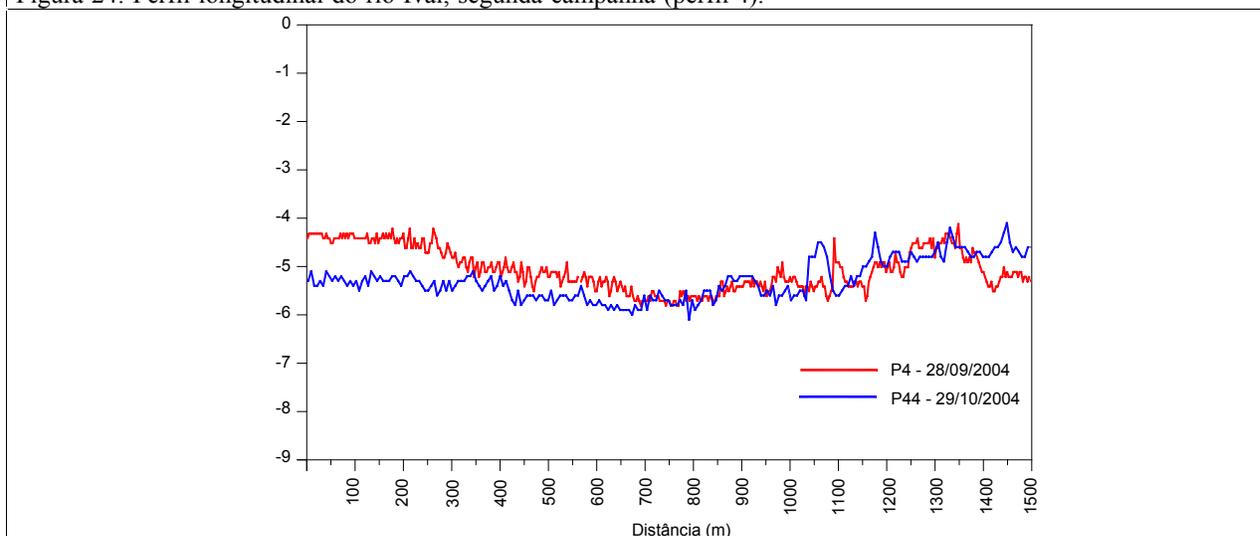


Figura 25: Perfil longitudinal do rio Ivaí, terceira campanha (perfil 4).

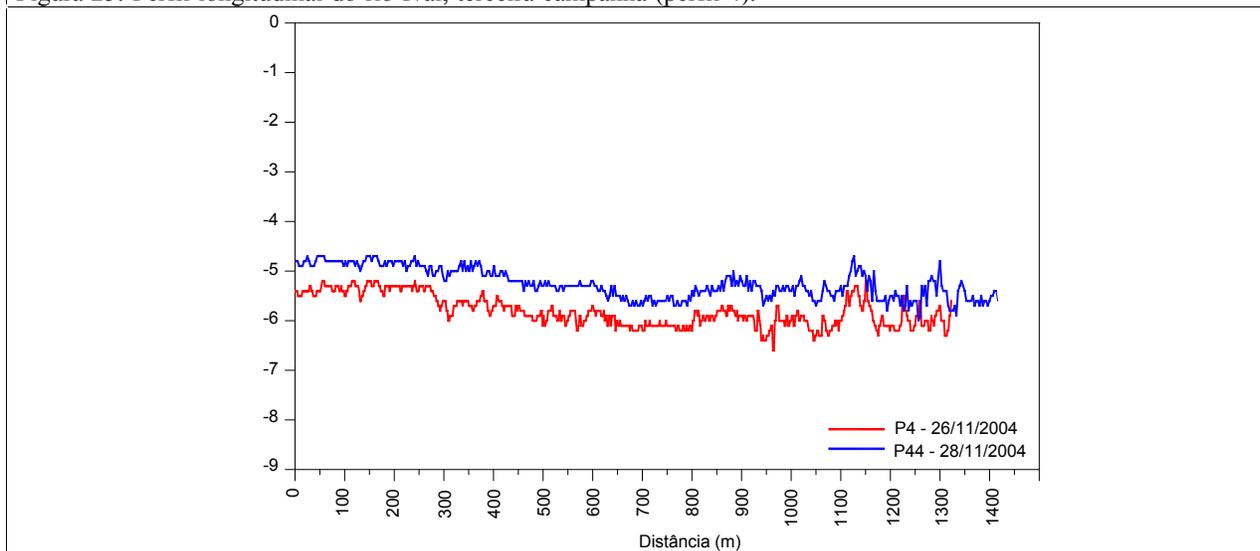


Figura 26: Perfil longitudinal do rio Ivaí, quarta campanha (perfil 4).

Os gráficos do deslocamento das dunas (Figuras 18 a 26), permitiram a caracterização das mesmas, em relação ao seu comprimento e altura nos diferentes perfis longitudinais, durante as quatro campanhas (Quadro 2). No trecho estudado, as maiores dunas se encontram no perfil 2 e as menores no perfil 3 (centro do leito). O perfil 4 (margem esquerda) é caracterizado por sedimentos mais finos, argila-siltosa e areia fina, com pequenas dunas a montante que aumentam a jusante. O perfil 1 (margem direita) foi descartado das análises das formas de leito porque esse trecho é caracterizado por ter leito rochoso.

No perfil 2 (Figuras 18, 19 e 20), encontra-se a maior heterogeneidade nos tamanhos das dunas verificada nas diferentes campanhas. A altura média das dunas diminui da segunda campanha para a quarta campanha, de 0,33 m para 0,21 m. O nível d'água teve o maior registro na terceira campanha (1,30 m no dia 29/10/04) e o menor também (0,20 m no dia 28/09/04). O comprimento médio das dunas foi maior na terceira campanha, 14,96 m, e menor na quarta campanha, 8,56 m. O nível d'água, provavelmente em função da velocidade de fluxo, influencia mais no comprimento das dunas do que na altura delas (Quadro 2).

O perfil 3 (Figuras 21, 22 e 23) possui formas de leito mais homogêneas, com altura média maiores na segunda campanha (0,25 m) e menores na terceira campanha (0,22 m). O comprimento médio das dunas diminui da segunda campanha (12,83 m) para a quarta campanha (9,28 m).

O perfil 4 (figuras 24, 25 e 26) é dividido em dois setores: os primeiros 900 metros são caracterizados por dunas menores: 0,20 m (segunda campanha), 0,23 m (terceira campanha) e, 0,16 m (quarta campanha) de altura, e o restante 600 metros apresentam dunas maiores: 0,26 m 0,21 m aproximadamente. A terceira campanha registrou o maior comprimento médio, 12,10 m (período de cheia), e o menor na quarta campanha, 7,58 m (vazante).

Em relação ao tamanho das dunas pode-se classificar, de acordo com o comprimento, que elas são maiores no perfil 2 e menores no perfil 4, o mesmo ocorre para a altura média das dunas. O perfil 4 é caracterizado pelas maiores velocidades e menores profundidades e o perfil 2, é marcado pelas maiores profundidades. Concordando então com a afirmação feita por Christofolletti (1981), Mazunber (2003) e Harms et al. (1982), que as dunas desenvolvem-se proporcionalmente com o aumento da profundidade. Por outro lado, analisando-se o perfil 4, em que se verifica um aumento na altura média das dunas com a diminuição do seu comprimento

(para jusante do perfil), tem-se também uma diminuição na velocidade da corrente. Isso sugere que a velocidade do fluxo também influencia no comprimento das dunas.

As Tabelas 3 e 4 mostram o tamanho médio das dunas encontradas durante as campanhas. As formas de leito variaram de 0,09 metros de altura até 1,22 metros, enquanto que o comprimento variou de 3,35 metros a 48,2 metros. Comparando esses valores com as dunas do rio Paraná, verifica-se que as suas dimensões são bem menores, pois a altura encontrada no rio Paraná foi de 0,60 metros a 2,00 metros e o comprimento variou de 50 metros a 150 metros.

Comprimento médio das formas de leito (m)				
Período	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)
05/12/2003	13,97	14,20	9,44	431,53
20/12/2003	15,42	11,90	11,48	664,4
07/06/2004	16,23	16,33	11,64	988,86
22/06/2004	15,08	12,96	13,19	777,61
28/09/2004	11,73	10,17	9,50	273,62
29/10/2004	19,89	21,22	17,94	2162,97
26/11/2004	6,04	11,09	5,30	678,2
28/11/2004	10,07	6,23	8,53	678,2

Tabela 3: Distribuição do comprimento médio das formas de leito (metros).

Altura média das formas de leito (m)				
Período	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)
05/12/2003	0,28	0,29	0,15	431,53
20/12/2003	0,30	0,22	0,27	664,4
07/06/2004	0,36	0,30	0,23	988,86
22/06/2004	0,29	0,22	0,25	777,61
28/09/2004	0,27	0,19	0,24	273,62
29/10/2004	0,33	0,29	0,27	2162,97
26/11/2004	0,20	0,26	0,16	678,2
28/11/2004	0,22	0,16	0,21	678,2

Tabela 4: Distribuição da altura média das formas de leito (metros).

De acordo com Ashley (1990) e Harms (1982) as formas de leito que obtiverem em sua relação altura-comprimento valores acima de 1:10 (valor estimado para as ondulações), podem ser classificadas como dunas. Na foz do rio Ivaí essa relação, variou de 1:30 a 1:73, e o tamanho das formas de leito, permitiram classificá-las como dunas.

O cálculo da velocidade de deslocamento das dunas e a descarga de fundo total (Equações 7 a 10) foram prejudicados pela dificuldade de interpretação das dunas pela metodologia aplicada, nos dois levantamentos consecutivos de cada campanha. Isso porque essa metodologia necessita da identificação da mesma duna em dois levantamentos consecutivos, para se fazer o cálculo de deslocamento que a duna sofreu nesse intervalo de tempo. Essa análise não foi feita, pois as dunas encontradas no trecho estudado do rio Ivaí, são muito pequenas e homogêneas, prejudicando a identificação da mesma duna nos levantamentos diferentes feitos em cada campanha. Essa metodologia terá melhores resultados em rios de grande porte, onde pode-se encontrar dunas de tamanhos maiores, portanto mais facilmente identificáveis.

#### 4.5 CARGA SUSPensa

Na área de estudo a concentração de carga suspensa não acompanha muitas vezes as taxas de precipitação, vazão e cota, verificadas no momento da coleta (Figura 27), isso se deve ao fato de que os fatores que influenciam nessa variável (precipitação, uso do solo, erosão das margens e vertentes etc.) estão atuando, em toda a bacia, a montante da área de estudo. As maiores taxas erosivas e conseqüentemente a maior produção de sedimentos se situam nas áreas onde a agricultura se dedica às culturas temporárias de ciclo anual: soja, algodão, milho e trigo, culturas essas que podemos encontrar ao longo da bacia hidrográfica. O período mais crítico é no período da preparação do solo para cultivo, onde o solo é arado e fica exposto por várias semanas. Isso acarreta no aumento do volume de sedimentos que chegam nos canais, como visto na bacia do ribeirão Maringá por BIAZIN, 2003.

Os meses de outubro e novembro (Figura 27) possuem uma alta concentração de sedimentos suspensos (0,01886 g/L e 0,0252 g/L respectivamente), isso pode estar ligado ao uso do solo da bacia, pois nesses meses é quando ocorre a rotação de cultura. No mês de março de 2004 foi registrado a menor concentração de sedimentos em suspensão (0,0029 g/L), período onde a quantidade de chuvas foi baixo e a vazão ficou abaixo da média. O mesmo acontece para o mês de setembro de 2004. Mas a carga de sedimentos em suspensão foi 2,7 vezes maior que a

do mês de março, confirmando o que foi dito acima, que a concentração não acompanha as taxas de precipitação, cota e vazão respectivamente.

O rio Ivaí apresentou uma concentração média de 0,013 g/L de sedimentos em suspensão, quatro vezes maior que o valor encontrado no rio Paraná, que foi de 0,0032 g/L (fonte: Barros, 2005 e Kuerten, 2005).

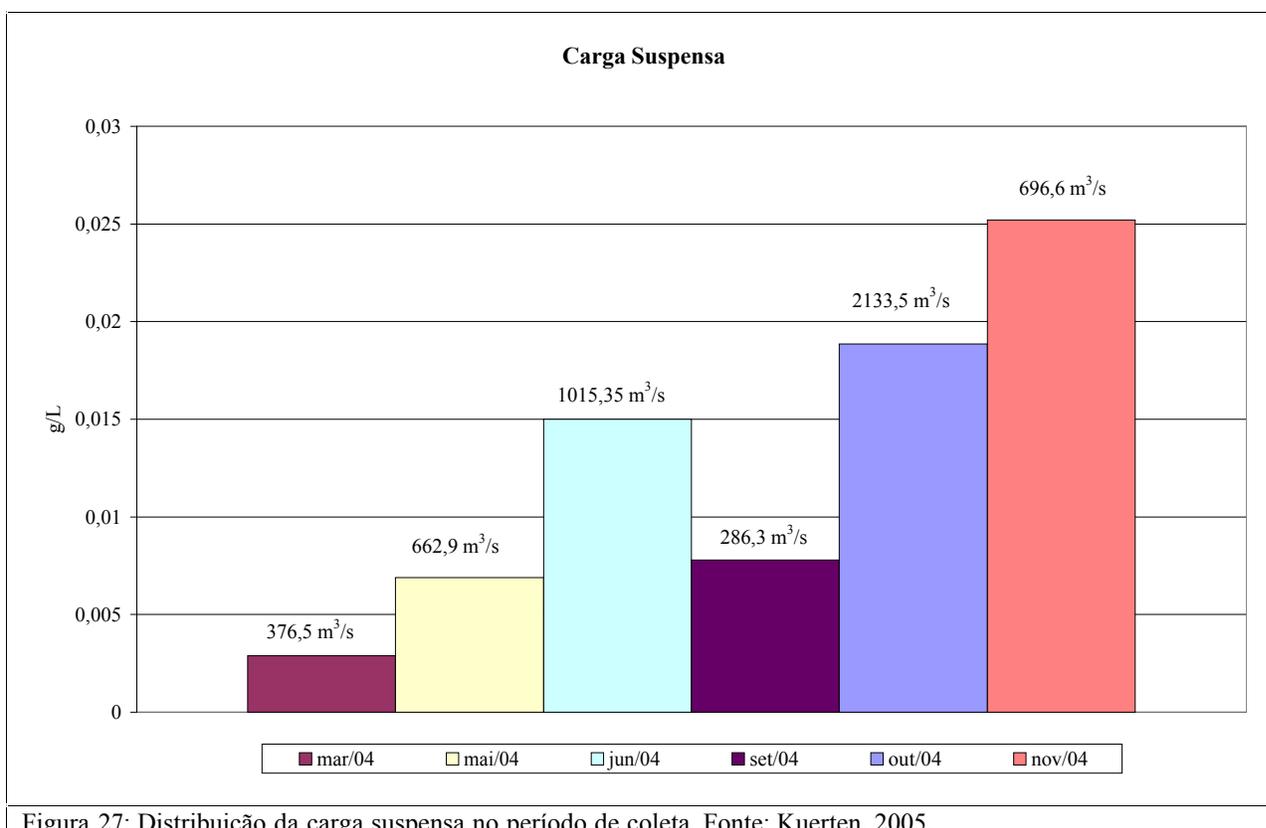


Figura 27: Distribuição da carga suspensa no período de coleta. Fonte: Kuerten, 2005.

#### 4.6 GRANULOMETRIA E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS SEDIMENTOS

As amostras coletadas no centro do rio apresentaram uma granulometria bastante regular, o mesmo não se pode dizer das amostragens próximas as margens. Da margem direita para a esquerda do rio Ivaí, encontra-se diferentes formas de leito. No perfil 1, margem direita, ocorre um trecho de leito rochoso (afloramento do Arenito Caiuá), em alguns casos a quantidade de areia foi bastante reduzida. Nos perfis 2 e 3 o leito é móvel, composto por areia média e fina. Já na margem esquerda (perfil 4) o leito também é móvel, mas com presença de lama (argila-siltosa) em alguns meses do ano e profundidades menores.

Os perfis 1 e 2 são os mais profundos porém a média da velocidade da corrente é mais alta nos perfis 3 e 4. As maiores velocidades encontradas foram no mês de junho/2004, coincidindo com as maiores profundidades verificadas no período de coleta (Quadro 3).

	05/12/2003		20/12/2003		07/06/2004		22/06/2004		28/09/2004		26/11/2004	
Perfis	Veloc.	Prof.										
Perfil 1	0,30 m/s	7 m	0,57 m/s	4,8 m	0,65 m/s	7,7 m	0,51 m/s	7 m	0,20 m/s	6,1 m	0,48 m/s	6,8 m
Perfil 2	0,32 m/s	6 m	0,59 m/s	5,8 m	0,70 m/s	6,2 m	0,55 m/s	6,4 m	0,20 m/s	5,8 m	0,52 m/s	6,7 m
Perfil 3	0,31 m/s	5,8 m	0,41 m/s	6,3 m	0,74 m/s	6,2 m	0,59 m/s	6,3 m	0,22 m/s	5,5 m	0,51 m/s	6,4 m
Perfil 4	0,36 m/s	5 m	0,60 m/s	4,6 m	0,67 m/s	5,1 m	0,56 m/s	5 m	0,23 m/s	4,8 m	0,52 m/s	5,3 m

Quadro 3 – Distribuição da velocidade e profundidade média durante as campanhas.

O Quadro 3, mostra a distribuição da velocidade de fluxo, no perfil longitudinal ao canal durante as campanhas realizadas no rio Ivaí (trecho estudado). No campo realizado no 07/06/03 foi encontrada a maior velocidade do fluxo (0,74m/s) com uma vazão de 988,86 m<sup>3</sup>/s. No mês de outubro/2004, a vazão era muito mais alta que as registradas anteriormente (vazão 2.162,97 m<sup>3</sup>/s), mas não foi possível medir a velocidade de fluxo.

No perfil 4 observar-se uma significativa dinâmica no fundo do leito, em resposta do ciclo cheia/ vazante. O sedimento de fundo encontrado neste trecho variou de argila/ silte para areia, refletindo os eventos erosivos e deposicionais presentes nesta área. Na maioria das amostragens, a percentagem de areia coletada no centro do rio (perfil 2 e 3) foi sensivelmente maior que os valores encontrados nas laterais (perfil 1 e 4).

#### 4.7 PARÂMETROS GRANULOMÉTRICOS

A distribuição espacial dos parâmetros granulométricos dos sedimentos de fundo é resultante dos fatores associados às condições hidrodinâmicas do fluxo que variam com o regime hidrológico do rio (PONÇANO<sup>5</sup>, 1986 apud FERNANDEZ et al., 2000).

Um das maneiras interessantes, de como os resultados das análises granulométricas podem ser usadas, é na determinação da energia do ambiente onde os sedimentos foram depositados e, partindo disso, podemos chegar aos processos que ocasionaram a deposição. Essa distribuição foi representada nas Figuras 28 a 33.

<sup>5</sup> PONÇANO, W. L. Sobre a interpretação ambiental de parâmetros estatísticos granulométricos: exemplos de sedimentos quaternários da costa brasileira. Revista Brasileira de Geociências. 16 (2): 157-190, 1986.

#### 4.7.1 Média ou Diâmetro Médio

A média ou diâmetro médio das partículas reflete a média geral de tamanhos dos sedimentos, sendo afetada pela fonte de suprimento do material, pelo processo de deposição e pela velocidade da corrente (SUGUIO, 1973).

Os mapas mostrados nas Figuras 28 a 33, representam a distribuição do diâmetro médio dos sedimentos de fundo da foz do rio Ivaí. Os mapas podem ser divididos em três partes: a margem direita é composta pelo leito rochoso, areia média (primeira campanha) e areia fina (segunda campanha); o centro do canal é marcado pela granulação de areia média; e na margem esquerda, encontramos um predomínio de areia fina e a presença de lama argila-sitosa (primeira campanha).

#### 4.7.2 Desvio Padrão ou Grau de Seleção

O desvio padrão ou grau de seleção é relacionado ao retalhamento dos depósitos e reflete variações nas condições do fluxo (velocidade e turbulência) no ambiente deposicional (PONÇANO<sup>6</sup>, 1986 apud FERNANDEZ et al., 2000). Essa relação varia de extremamente mal selecionado a muito bem selecionado.

No trecho de estudo, os sedimentos encontram-se, na maioria das vezes, como moderadamente selecionado. Apenas no perfil 4 (05/12/03) os depósitos se enquadraram como muito pobremente selecionado, fato esse relacionado a presença de lama e areia.

#### 4.7.3 Assimetria

O parâmetro assimetria tem sido usado com sucesso na identificação de ambientes em que predomina deposição (assimetria positiva) e remoção seletiva (assimetria negativa) (DUANE<sup>7</sup>, 1964 apud FERNANDEZ et al., 2000). A seleção varia de assimetria muito positiva a assimetria muito negativa.

No período estudado foi observado que a distribuição dos sedimentos variou de assimetria positiva (deposição) a assimetria negativa (remoção) para os quatro perfis de acordo com a dinâmica do ciclo hidrológico.

---

<sup>6</sup> PONÇANO, W. L. Sobre a interpretação ambiental de parâmetros estatísticos granulométricos: exemplos de sedimentos quaternários da costa brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. 16 (2): 157-190, 1986.

<sup>7</sup> DUANE, D. B. Significance of skewness in recent sediments. Western Palmico Sound. North Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34: 864-874, 1964.

Esses resultados caracterizam o perfil 1 como predominantemente erosivo e os outros predominantemente deposicionais. Isso é comprovado pela presença de afloramento rochoso exposto no leito do rio, ao longo de todo o período deste trabalho.

#### 4.7.4 Curtose

A curtose é a medida que retrata o grau de agudez dos picos nas curvas de distribuição de frequência. A maior parte das medidas de curtose computa a razão entre as dispersões (espalhamento) na parte central e nas caudas das curvas de distribuição. As curvas platicúrticas contêm caudas de sedimentos mais finos e mais grossos, indicando mistura de populações distintas. Nas distribuições leptocúrticas, os sedimentos são bem selecionados na parte central da distribuição (SUGUIO, 1973). Essas distribuições variam de extremamente leptocúrtica a muito platicúrtica.

Valores de curtose muito altos ou muito baixos podem sugerir que um tipo de material foi selecionado em uma região de alta energia e então transportado sem mudança das características para um outro ambiente, onde ele se misturou com outro sedimento, em equilíbrio com diferentes condições, possivelmente de baixa energia (SUGUIO, 1973).

Os perfis se enquadraram dentro das três variáveis da curtose. A distribuição de curtose variou de platicúrtica para os dias 05/12/2003, 20/12/2003 e 07/06/2004; mesocúrtica para os dias 22/06/2004 e 26/11/2004; e leptocúrtica para o dia 28/09/2004. De modo geral, observa-se que os sedimentos encontrados no rio Ivaí, neste trecho estudado, possuem uma mistura de sedimentos distintos (finos a mais grossos).

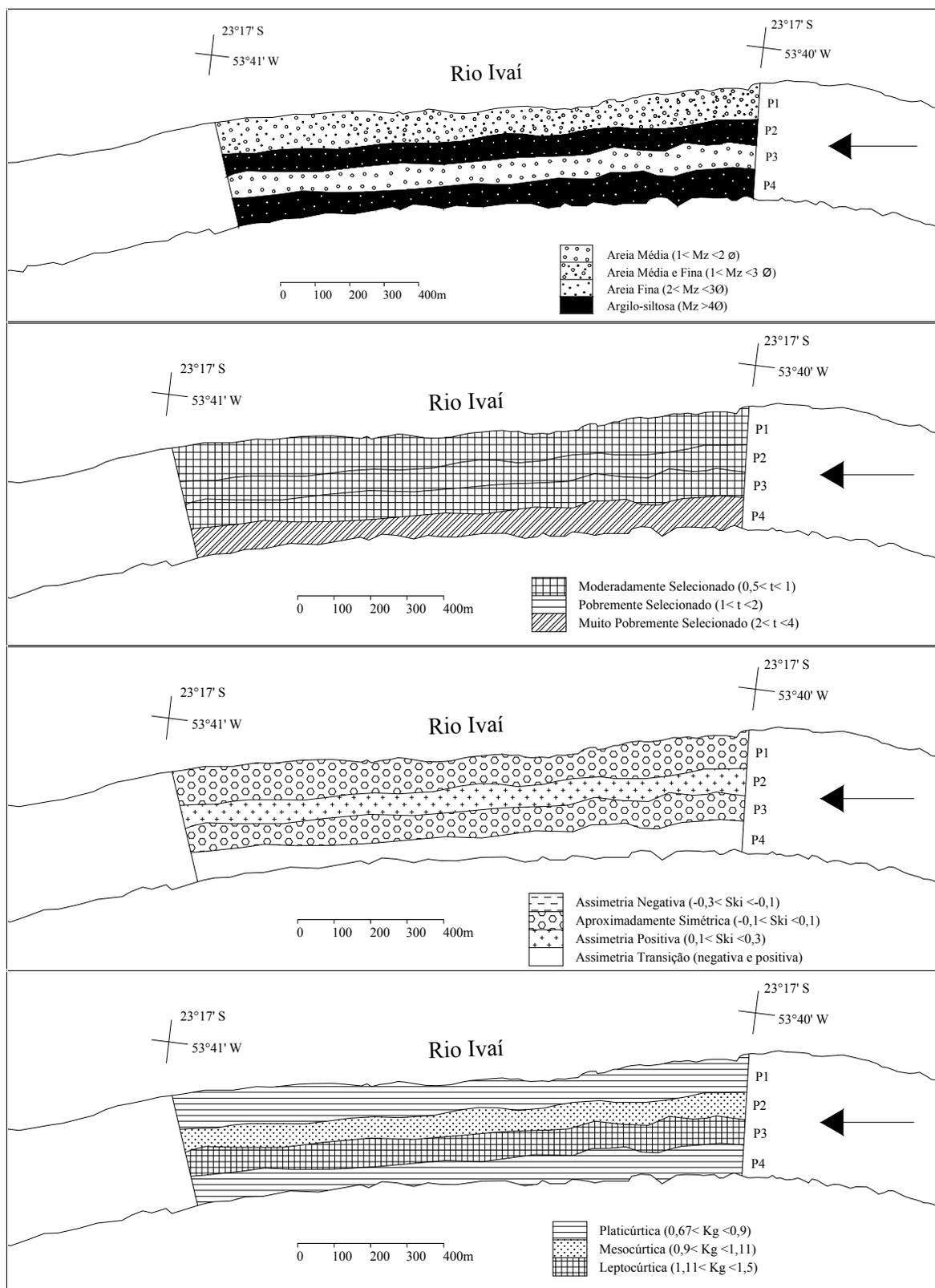


Figura 28: Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 05/12/03 (primeira campanha).

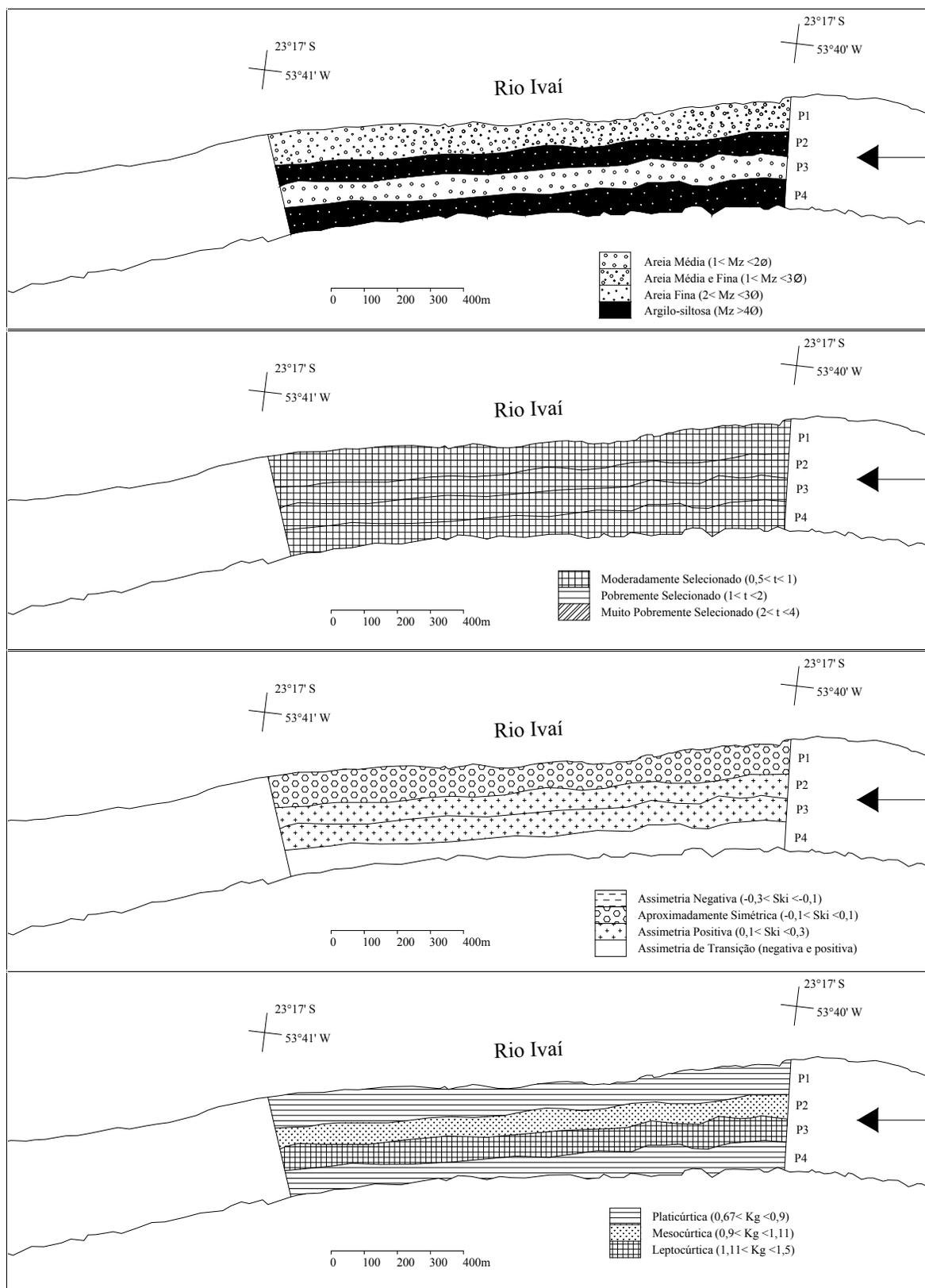


Figura 29: Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 20/12/03 (primeira campanha).

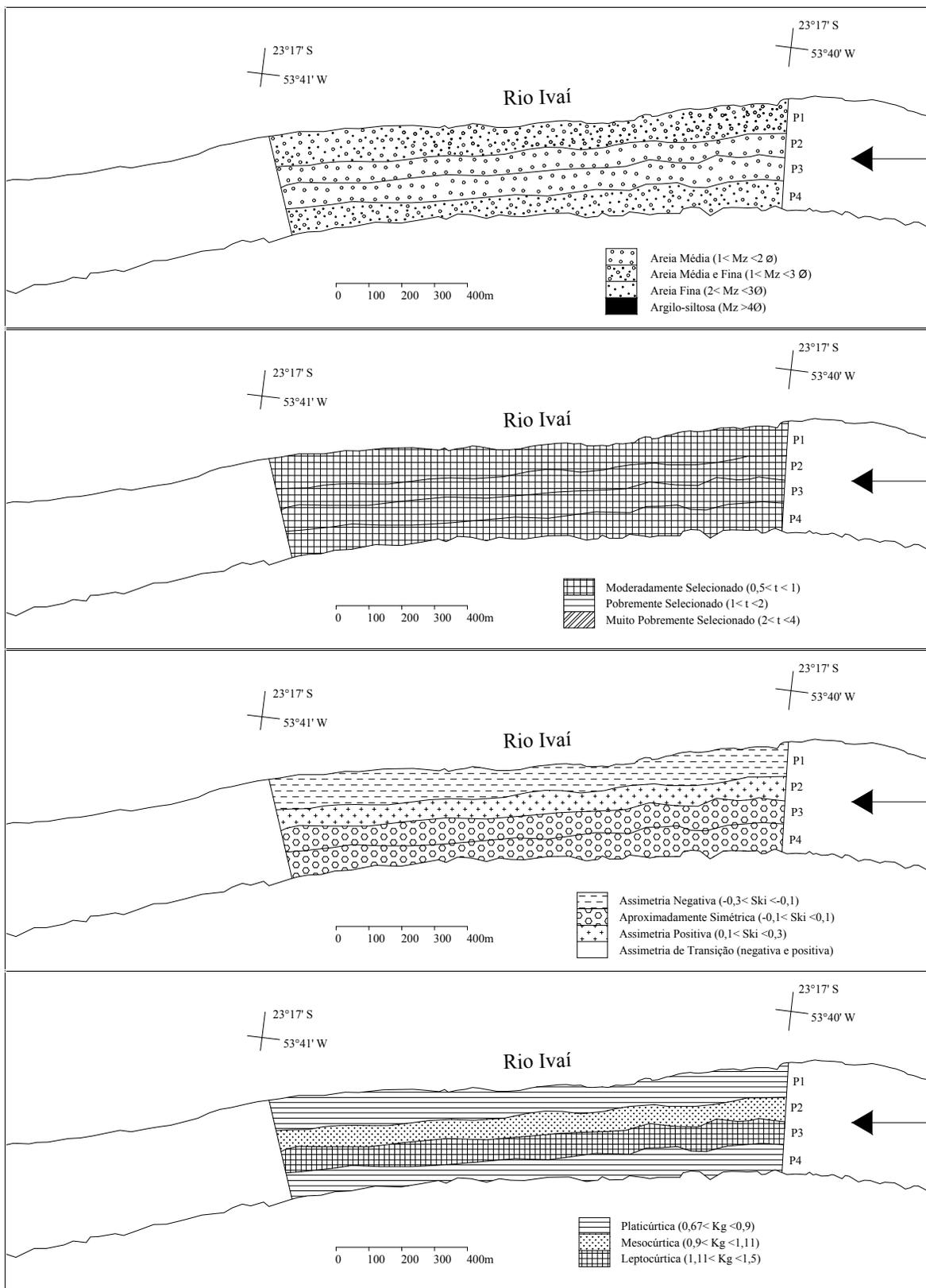


Figura 30: Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 07/06/04 (segunda campanha).

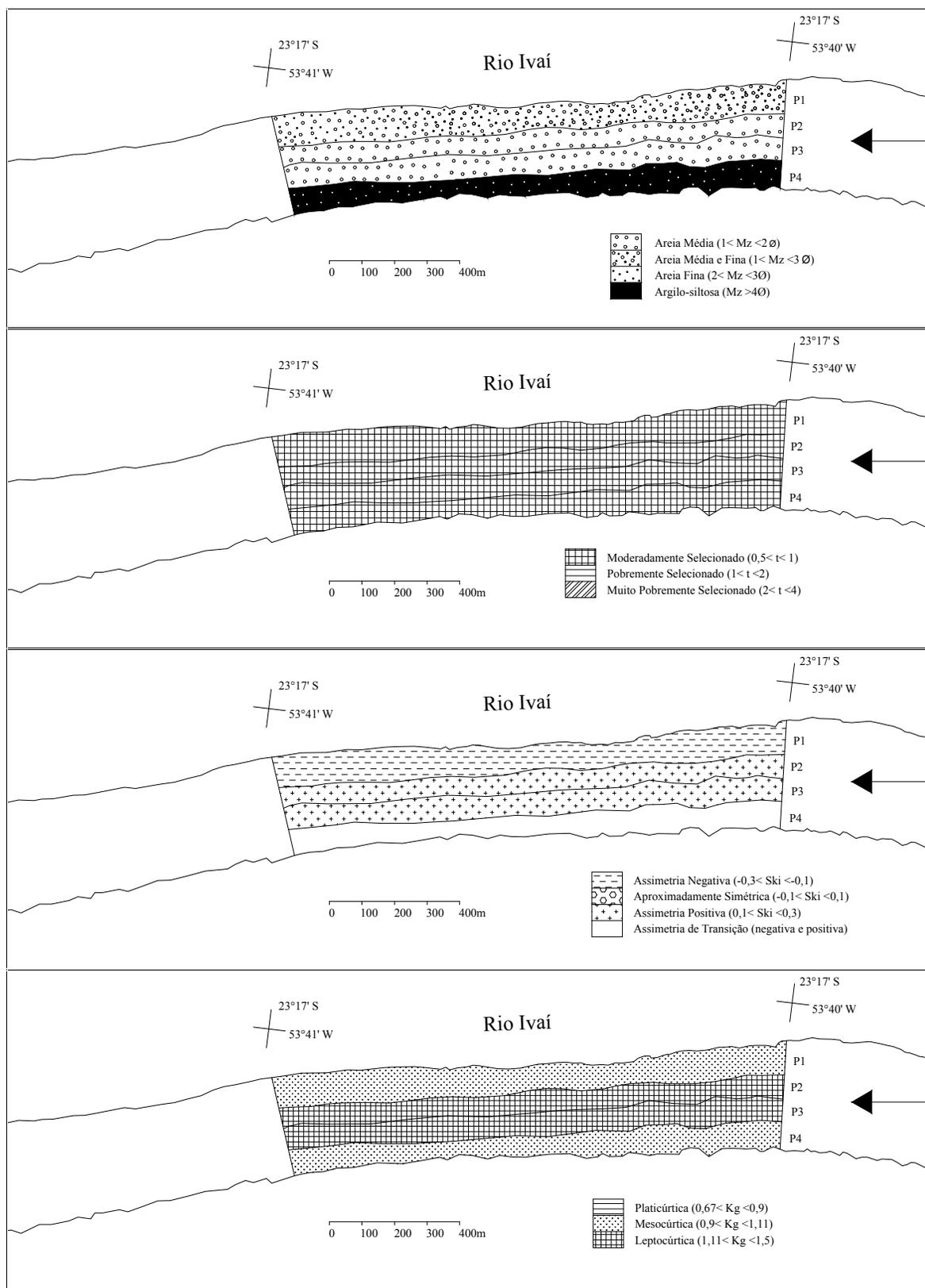


Figura 31: Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 22/06/04 (segunda campanha).

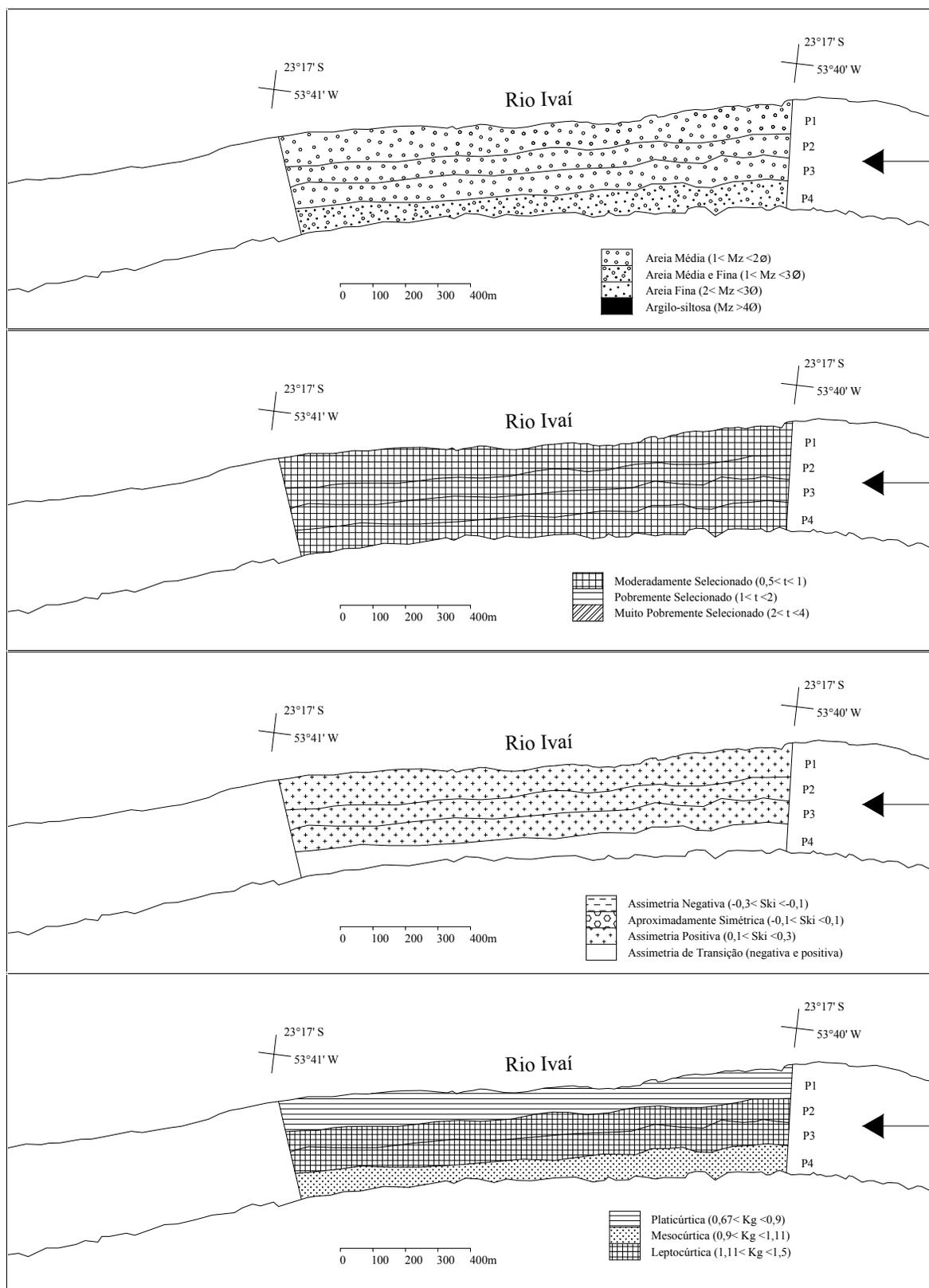


Figura 32: Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 28/09/04 (terceira campanha).

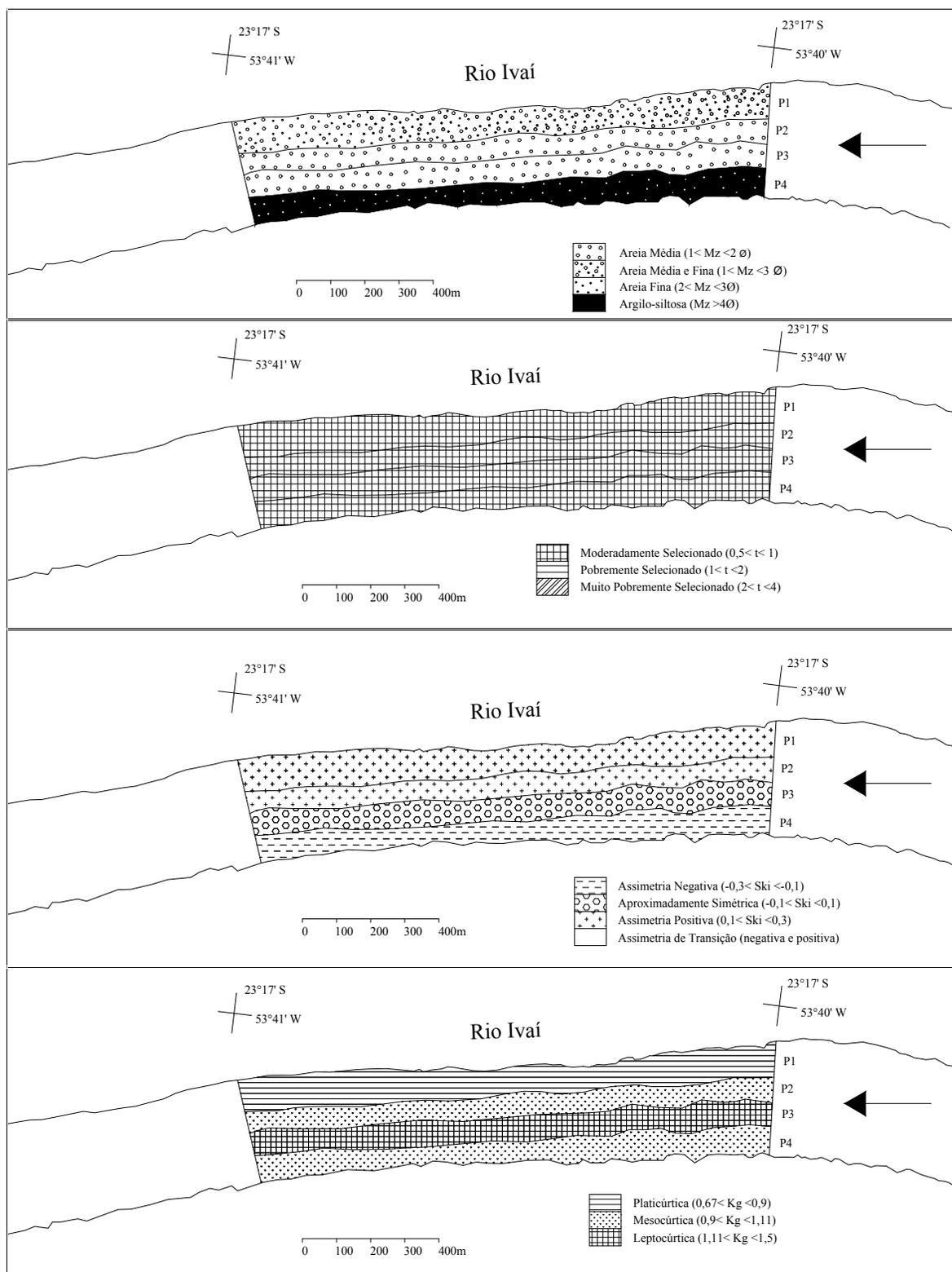


Figura 33: Distribuição do diâmetro médio (A), do grau de seleção ou desvio padrão (B), assimetria (C) e curtose (D) no rio Ivaí, no dia 26/11/04 (quarta campanha).

#### 4.8 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS SEDIMENTOS

No período estudado, pode ser observado que as modificações nas feições erosivas e deposicionais após os períodos de enchentes são significativas, demonstrando dessa forma a rápida resposta do rio Ivaí (área de estudo) frente às mudanças do ciclo hidrológico. No período de vazão média (431,53 m<sup>3</sup>/s e 664,4 m<sup>3</sup>/s, primeira campanha) o rio apresentava leito rochoso no perfil 1 (margem direita), areia média no perfil 2 e 3, e areia fina/ lama (argila-siltosa) no perfil 4 (margem esquerda). Na segunda campanha, onde a vazão estava acima da média (988,86 m<sup>3</sup>/s e 777,61 m<sup>3</sup>/s), a distribuição granulométrica no perfil 1 foi de areia fina, no perfil 2 e 3 areia média e areia média/ fina e, lama para o perfil 4. Nesta mesma campanha observou-se a presença de seixos de tamanhos diferentes nos perfis 2, 3 e 4. A terceira campanha teve levantamentos com vazões extremas (273,82 m<sup>3</sup>/s e 2162,97 m<sup>3</sup>/s), o primeiro levantamento foi registrado a presença de areia média em todos os perfis, mas o perfil 4 constatou-se, também, a granulometria de areia fina. Na quarta campanha, a vazão encontrada foi de 678,2 m<sup>3</sup>/s (próximo a vazão média), a distribuição granulométrica variou de areia média e fina para o perfil 1, areia média para os perfis 2 e 3, e areia fina e lama para o perfil 4.

No rio Ivaí no mês de Dezembro/03, Junho/04 e Novembro/04 foram observados que nos sítios dentro do canal onde as velocidades são maiores, têm-se a presença de argila depositada no leito fluvial, como pode ser verificado no perfil 4 das Figuras 28, 29, 31 e 33. Isto se deve ao efeito de Hjülstrom-Sundborg que dificulta a remoção deste sedimento fino após sua deposição, mesmo que ocorram posteriores aumentos na velocidade do fluxo.

Um estudo feito no rio Ivaí em 1980 (WILSON JÚNIOR et al., 1980) verificou que uma grande porcentagem do material do leito do rio Ivaí é constituído de areia de granulometria média, o que foi verificado novamente nesta pesquisa. Apenas uma pequena fração corresponde à areia fina (cerca de 10%, para as velocidades mais baixas: 0,30 – 0,70 m/s).

##### 4.8.1 Granulometria da primeira campanha (05/12/03 e 20/12/03)

As Figuras 28 e 29 (1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> coleta da primeira campanha), representam a distribuição do diâmetro médio dos sedimentos de superfície de fundo. Pode-se dividir os mapas da primeira campanha em três setores: perfil 1 com a presença de areia média e fina, o perfil 2 e 4 com areia fina e argila-siltosa e o perfil 3, com areia média. O perfil 1 é marcado pelas profundidades maiores e o perfil 4 pelas maiores velocidades.

O grau de seleção na primeira campanha se comportou na maior parte dos perfis como moderadamente selecionado (entre 0,59 e 0,63), apenas no perfil 4 (05/12/03) os sedimentos apresentaram como pobremente selecionados (2,213).

Os sedimentos coletados nesta campanha apresentaram-se como aproximadamente simétricos, apenas no perfil 2 verificou-se uma assimetria positiva, indicando talvez uma deposição (presença de lama). No dia 20/12/03, o perfil 3 passa a ter uma assimetria positiva (0,17), podendo estar ligada a deposição neste trecho de estudo. O perfil 4 apresentou os dois tipos de assimetria negativa e positiva, indicando possivelmente processos de deposição e remoção de sedimentos ao longo do perfil.

De modo geral, os perfis apresentaram o mesmo padrão de curtose para a primeira campanha: os perfis 1 e 4 tiveram distribuições platicúrticas, indicando mistura de populações distintas; o perfil 2 com distribuições mesocúrtica e, o perfil 3 uma área leptocúrtica, indicando uma remoção de uma parte dos sedimentos por correntes de fundo.

#### **4.8.2 Granulometria da segunda campanha (07/06/04 e 22/06/04)**

Nas Figuras 30 e 31, observa-se que o diâmetro médio encontrados na segunda campanha para o perfil 1 e 4, foi de areia média e fina. Apenas o perfil 4 (no dia 22/06) apresentou argila-siltosa e areia fina, os perfis 2 e 3 tiveram uma distribuição de areia média. Os perfis apresentaram um grau de seleção moderadamente selecionado para toda a campanha (entre 0,52 e 0,627).

A assimetria encontrada no perfil 1 foi negativa, sugerindo uma remoção seletiva de material; o perfil 2 teve uma assimetria positiva (0,135), indicando uma deposição; os perfis 3 e 4 tiveram uma distribuição aproximadamente simétrica (entre -0,1 e +0,1) para o dia 07/06; enquanto que no dia 22/06, o perfil 3 no ambiente predominou a deposição (assimetria positiva, +0,146).

A curtose variou nos dias coletados: no dia 07/06 os perfis 1 e 4 apresentaram uma distribuição com mistura de populações distintas (platicúrtica: 0,745 e 0,741); o perfil 2 teve uma distribuição mesocúrtica (1,065) e, o perfil 3 uma distribuição leptocúrtica (1,27) indicando remoção de material. Já no dia 22/06, os perfis 1 e 4 se apresentaram como mesocúrtica (0,93 e 0,98) e, os perfis 2 e 3 como leptocúrtica (1,176 e 1,172).

#### 4.8.3 Granulometria da terceira campanha (28/09/04)

O mapa da Figura 32 mostra que os perfis 1, 2 e 3 apresentaram areia média na distribuição do diâmetro médio, enquanto o perfil 4, areia média e fina. O grau de seleção encontrado nos perfis nessa campanha foi de moderadamente selecionado (0,569 a 0,641) para todos os trechos analisados. A assimetria foi positiva para os perfis 1, 2 e 3, sugerindo um ambiente em que predominou a deposição. O perfil 4 encontra-se na transição, com assimetria positiva e negativa. A curtose se enquadrou como platicúrtica (0,82) para o perfil 1, apontando uma mistura de material, os perfis 2 e 3 apresentaram uma distribuição leptocúrtica mostrando uma possível remoção de material (1,12 e 1,21) e o perfil 4, mesocúrtica (1,076).

#### 4.8.4 Granulometria da quarta Campanha (26/11/04)

A Figura 33, demonstra que a distribuição dos sedimentos apresentou-se com um diâmetro médio de areia média/ fina para o perfil 1, o perfil 2 e 3, tem-se a presença de areia média e para o perfil 4, a mistura de areia fina e lama.

O desvio padrão se enquadrou como moderadamente selecionado para os quatro perfis (os valores variaram de 0,53 a 0,641). A assimetria foi positiva para os perfis 1 e 2 (0,173 e 0,128), aproximadamente simétrica para o perfil 3 (0,099) e negativa para o perfil 4 (- 0,226). Os valores de curtose foram variados, a distribuição dos sedimentos no perfil 1 se enquadrou como platicúrtica (0,87), nos perfis 2 e 4 os sedimentos apresentaram-se com uma distribuição mesocúrtica (1,105 e 1,032) e leptocúrtica para o perfil 3 (1,192).

## 5 CONCLUSÕES

O estudo realizado no trecho inferior do rio Ivaí, na confluência com o rio Paraná, trouxe os seguintes resultados:

- Os levantamentos batimétricos demonstraram que as formas de leito encontradas nesse trecho devem ser classificadas como dunas, pois possuem uma relação altura-comprimento entre 1:30 e 1:73.
- Na margem direita do canal encontra-se leito rochoso, o centro do leito é marcado por dunas homogêneas, com relação a sua forma, na margem esquerda, as dunas são mais heterogêneas, as formas de leito aumentam para a jusante.
- As variáveis hidrológicas: cota, vazão e a velocidade de fluxo, influenciam mais no comprimento das dunas do que na sua altura, pois nos dias de maiores registros encontram as dunas com maior comprimento e, isso nem sempre coincidia com as maiores alturas.
- A velocidade de deslocamento das dunas e a quantificação da carga de fundo transportada pelo rio Ivaí, no trecho estudado, não pôde ser calculada pela dificuldade na identificação das dunas. Por serem formas muito pequenas, a metodologia desenvolvida por Amsler não pôde ser aplicada. Esse tipo de análise deve ser aplicado em rios de grande porte, onde o tamanho das dunas é maior, como é o caso do rio Paraná. Nesse rio as dunas variaram de 0,60 metros a 2 metros de altura, e 50 metros a 150 metros de comprimento; enquanto que o rio Ivaí, apresentou dunas de 0,09 metros a 1,22 metros de altura e comprimento de 4 metros a 47 metros.
- A carga suspensa transportada pelo rio Ivaí na seção levantada, não acompanha as taxas de precipitação, vazão e cota da área estudada. A concentração média de carga em suspensão foi de 0,0128 g/L. Nos meses de outubro de 2004 e novembro de 2004 foram encontrados os maiores valores de carga suspensa, 0,01886 g/L e 0,0252 g/l respectivamente.
- As maiores velocidades médias do fluxo foram encontradas onde a profundidade era menor, ou seja, na margem esquerda do rio (perfil 4) era o trecho mais raso e com maiores velocidades, enquanto que, na margem direita (perfil 1) era o mais profundo (leito rochoso) mas com velocidades menores.

- A velocidade do rio Ivaí próxima a foz é fortemente influenciada pela dinâmica do rio Paraná, que barra o seu fluxo. Esse efeito facilita a decantação das partículas suspensas, aumentando assim, os depósitos sedimentares. O inverso também foi constatado, no mês de outubro de 2004, quando o rio Ivaí represou o fluxo do rio Paraná.
- O rio Ivaí, no trecho estudado, se caracteriza como um rio turbulento e tranquilo, com uma vazão média de  $727,73 \text{ m}^3/\text{s}$ , e uma velocidade crítica de  $0,029 \text{ m/s}$ .
- A distribuição granulométrica nesse trecho se apresentou em geral da seguinte forma: na margem direita (perfil 1) a presença do leito rochoso (afloramento do Arenito Caiuá); no centro do leito (perfil 2 e 3), o leito é móvel com granulometria de areia média e fina. Na margem esquerda (perfil 4), o leito também é móvel e composto por areia fina e a presença de lama (argila-siltosa).
- As formas de leito influenciam na resistência do escoamento, desta forma, trabalhos futuros deverão ser realizados de forma a identificar a carga de fundo e a velocidade com que as dunas se movimentam. Obtendo assim, uma melhor caracterização do transporte sedimentar do rio Ivaí, em sua foz.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, Maria Teresa; FERNANDES, Sônia; MARIANO, Ana Catarina; PIMENTA, Maria Teresa; CALVÃO, Brito; GONZAGA, Abel. **Monitorização batimétrica de albufeiras: aspectos metodológicos**. INAG: DSRH, 2000.
- AMSLER, Mario L.; PRENDES, Hector. Transporte de sedimentos y procesos fluviales asociados. In: PAOLI, C.; SCHEREIDER, M. **El río Paraná em su tramo médio**. Santa Fé: Centro de Publicaciones, Secretaria de Extensión, UNL, 2000.
- AMSLER, Mario L.; GAUDIN, Horacio E. La superposicion de dunas y el transporte de la carga de fondo em el río Paraná. In: CONGRESSO NACIONAL DEL ÁGUA, 15., Santa Fé, **Anais...** Santa Fé: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH); Universidad Nacional Del Litoral (UNL), 1994.
- ANA. **Agencia Nacional de Águas**. Disponível em <http://www.ana.gov.br>. Acesso em 17 nov. 2003.
- ANDRADE, Aparecido Ribeiro de. **Variabilidade da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do Ivaí – Paraná**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003. 99f.
- ASHLEY, Gail M.; CHAIRPERSON, Symposium. **Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem**. Journal of Sedimentary Petrology, New Jersey, v. 60, n. 1, p. 160-172, Jan. 1990.
- BARROS, Carolina Silva. **Dinâmica sedimentar e hidrológica na confluência do rio Ivaí com o rio Paraná, município de Icaraíma – PR**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.
- BIAZIN, Pollyana Crocetta. **Concentração de sedimentos em suspensão na bacia do ribeirão Maringá, como um indicador geoambiental**. Trabalho de Conclusão de Curso. Maringá, 2003.
- BITTENCOURT, A. V. L. **Transporte de sólidos na bacia hidrográfica do rio Ivaí**. Boletim de Paranaense de Geociências, Curitiba, n. 35, 1982.
- BORDAS, Marc P.; SEMMELMANN, Franz R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 1997.
- CALDAS, A. G. Pereira. **Estratigrafia e sedimentologia: geologia estrutural, aerofotogeologia**. Brasília, DF: Instituto Nacional do Livro, 1972.
- CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- CHRISTOFOLLETTI, Antonio. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgar Blücher, 1981.

CUNHA, Sandra Baptista; GUERRA, Antonio José Teixeira. **Geomorfologia**: exercícios, técnicas e aplicações. Bertrand Brasil. 1996.

CURTY, Marlene Gonçalves; CRUZ, Anamaria da Costa; MENDES, Maria Tereza Reis. **Apresentação de trabalhos acadêmicos, dissertações e teses**: (NBR 14724/2002). 1. reimpr.- Maringá: Dental Press, 2002.

DESTEFANI, Edilaine Valéria. **Regime hidrológico do rio Ivaí – PR**. 64p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

DNAEE. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. Bacias dos rios Ivaí, Piquiri e Paraná; dados atualizados até 1984. **Boletim Fluviométrico**. Brasília, DF, 1985. p. 15-28.

GIANNINI, P. C.; RICCOMINI, C. Sedimentos e Processos Sedimentares In: TEIXEIRA, W.; MOTTA, M. C.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. Reimprensão, 2001.

FERNANDES, L.A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP)**: os Grupos Bauru e Caiuá. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez; SANTOS, Manoel Luiz, FULFARO, Vicente José. Caracterização e distribuição dos sedimentos de fundo do rio Paraná em Porto Rico (PR). Bauru: Revista Ciência Geográfica, v. 1, n. 15, jan./abr., 2000. p 25-32.

GASPARETTO, Nelson Vicente Lovatto. **As formações superficiais do noroeste do Paraná e sua relação com o Arenito Caiuá**. 1999. 186 f. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GASPARETTO, Nelson Vicente Lovatto; SOUZA, Marta Luzia. Contexto geológico-geotécnico da Formação Caiuá no Terceiro Planalto Paranaense – PR. In: ENCONTRO GEOTÉCNICO DO TERCEIRO PLANALTO PARANAENSE, 1, 2003, Maringá, 2003.

GASTALDINI, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Conceitos para a avaliação da água. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D (Orgs.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: FINEP/ABRH, 2001.

HARMS, J.C.; SOUTHARD, J.B.; WALKER, R.G. **Structures and sequences in clastic rocks**. Calgary: Ed. Soc. Of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEMPS), n. 9, 1982.

KUERTEN, Sidney. **Caracterização longitudinal dos sedimentos hidrotransportados no baixo rio Ivaí – PR**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

LANNA, Antonio Eduardo. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: ABRH, 1997.

MAACK, Reinhard. **Geografia física do Paraná**. Curitiba: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981.

MARTINS, Débora Pinto. **Dinâmica das formas de leito e transporte de carga de fundo no alto rio Paraná**. 2004. 62 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

MAZUMDER, Rajat. **Sediment transport, aqueous bedform stability and morphodynamics under unidirectional current**: a brief overview. *Journal of African Earth Sciences*, Yokohama, v. 36, p. 1-14, 2003.

MELO, U.; SUMMERHAYES, C. P.; TORNER, L. G. **Metodologia para o estudo de material em suspensão na água do mar**. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3-4, p. 115-127, 1975.

**Atlas geológico do estado do Paraná**. Curitiba: MINEROPAR. 2001. CD-ROM.

NANSON, G. C., CROKE, J. C. A genetic classification of floodplains. **Geomorphologic**. Amsterdã, v. 4, p. 459-486, 1992.

PAIVA, João Batista Dias de. Métodos de cálculos do transporte de sedimentos em rios. In: PAIVA, João Batista Dias de; PAIVA, Eloiza Maria Candura Dias de (Orgs). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

PARANA. **Qualidade das águas interiores do estado do Paraná 1987-1995**. Curitiba: Secretaria de estado do meio ambiente e recursos hídricos, 1997.

Atlas do estado do Paraná. **Instituto de terras, cartografia e florestas**. Atlas do estado do Paraná. Curitiba: Secretaria de estado da agricultura e do abastecimento, 1987.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Brasil, 1976.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica básica**. 2. ed. São Carlos: EESC – USP, 1999.

PRENT, Mariëtte T. H.; HICKIN, Edward J. **Annual regime of bedforms roughness and flow resistance**. Lilloet River, British Columbia, BC. (2001). Portal da Capes.

RAMOS, C. L. Critérios indicativos para a caracterização da potencialidade do assoreamento em reservatórios urbanos. In: PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, B. D. (Eds). **Caracterização Quali-Quantitativa na Produção de Sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2001

SANTOS, Manoel Luiz dos. **Faciologia e evolução das barras de canal do rio Paraná na região de Porto Rico, PR**. 1991. 113 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1991.

SANTOS, Manoel Luiz dos. **Estratigrafia e evolução do sistema siliciclástico do rio Paraná no seu curso superior**: ênfase à arquitetura dos depósitos, variação longitudinal das fácies e processos sedimentares. 1997. 146 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SANTOS, Manoel Luiz dos; STEVAUX, José Cândido; GASPARETTO, Nelson Vicente Lovatto. Geologia e geomorfologia da planície do rio Ivaí – PR. In: Relatório do Projeto Fundação Araucária. **Regime hidrológico do rio Ivaí em seu curso inferior**: ênfase a análise geoambiental. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

SILVA, Alexandre Marco; SCHULZ, Harry Edmar; CAMARGO, Plínio Barbosa. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RIMA, 2003.

SILVA, Samia. A. **Regime hidrológico e comportamento morfo hidráulico do rio Araguaia**. 2002. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2002.

SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V. **Physiographic and hydraulic studies of rivers: resistance to flow in alluvial channel**. Washington: Geol.Surv.Prof. Pap, 1966.

STEWAX, José Cândido. **Característica e dinâmica da forma de leitos do rio Paraná**: Proposição de gerenciamento e conservação. Projeto. Maringá: UEM, 2002.

STRASSER, Maximiliano Andrés. **Estudo da geometria das formas de fundo no curso médio do rio Amazonas**. 2002. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SUDERHSA. **Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**. Disponível em: <http://www.pr.gov.br/meioambiente/suderhsa/index.shtml>. Acesso em 25 mar. 2004.

SUREHMA. **Informações sobre sólidos transportados em suspensão pelos rios**. [S.l.: sn], 198?.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Edgar Blücher: EDUSP, 1973.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares**: propriedade, gênese e importância Econômica. São Paulo: Edgar Blücher: EDUSP, 1980.

TRENTO, A.; AMSLER, M. L.; PUJOL, A. **Perfiles observados de velocidad en un tramo del rio Paraná**: análisis teórico. In: Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 14., Montevideo, **Anais...**, 1990.

TROPPMAIR, H. Perfil fitoecológico do estado do Paraná. **Boletim de Geografia**, Maringá, ano 8, n. 1, 1990.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: ABRH, 1997.

\_\_\_\_\_. Vazão máxima e hidrograma de projeto. In: \_\_\_\_\_. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: ABRH, 1997.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WILSON JÚNIOR, Geraldo; RODRIGUES, Hugo Túlio; SANTOS, José Soares dos. **Estudos hidráulico-sedimentológicos realizados no trecho inferior do rio Ivaí**. [S.l.:sn.], 1980. v. 1.