



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS  
EXATAS



HUDSON DE AZEVEDO MACEDO

EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA E DINÂMICA HIDROSSEDIMENTAR DA  
PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ, QUATERNÁRIO DO PANTANAL

Rio Claro-SP  
2017



HUDSON DE AZEVEDO MACEDO

EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA E DINÂMICA HIDROSEDIMENTAR DA  
PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ, QUATERNÁRIO DO PANTANAL

Texto apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: José Cândido Stevaux

Coorientador: Aguinaldo Silva

Rio Claro-SP  
2017

551.42 Macedo, Hudson de Azevedo  
M141e Evolução geomorfológica e dinâmica hidrossedimentar  
da Planície Fluvial Paraguai-Corumbá, Quaternário do  
Pantanal / Hudson de Azevedo Macedo. - Rio Claro, 2017  
193 f. : il., figs., tabs., quadros

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Orientador: José Cândido Stevaux

Coorientador: Aguinaldo Silva

1. Geomorfologia. 2. Pantanal. 3. Rio Paraguai. 4.  
Geomorfologia fluvial. 5. Hidrossedimentologia. 6. Mudanças  
paleoambientais. I. Título.

HUDSON DE AZEVEDO MACEDO

EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA E DINÂMICA HIDROSEDIMENTAR DA  
PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ, QUATERNÁRIO DO PANTANAL

**Comissão Examinadora**

Dra. Débora Pinto Martins

Prof. Dr. Fabiano do Nascimento Pupim

Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Prof. Dr. Mario Luis Assine

Prof. Dr. José Cândido Stevaux (orientador)

Resultado: **APROVADO**

Rio Claro - SP  
Setembro de 2017



*Dedico esta tese a todos que de alguma forma contribuíram para a sua realização, em especial a minha família, que tem como seus pilares minha amada Ane Carolina, meu querido Choppin e minha adorada mãe Jeanete de Azevedo Macedo.*



Quando um rio corta, corta-se de vez  
o discurso-rio de água que ele fazia;  
cortado, a água se quebra em pedaços,  
em poços de água, em água parálitica.  
Em situação de poço, a água equivale  
a uma palavra em situação dicionária:  
isolada, estanque no poço dela mesma,  
e porque assim estancada, muda,  
e muda porque com nenhuma comunica,  
porque cortou-se a sintaxe desse rio,  
o fio de água por que ele discorria.  
O curso de um rio, seu discurso-rio,  
chega raramente a se reatar de vez;  
um rio precisa de muito fio de água  
para refazer o fio antigo que o fez.  
Salvo a grandiloquência de uma cheia  
lhe impondo interina outra linguagem,  
um rio precisa de muita água em fios  
para que todos os poços se enfrasem:  
se reatando, de um para outro poço,  
em frases curtas, então frase e frase,  
até a sentença-rio do discurso único  
em que se tem voz a seca ele combate

João Cabral de Melo Neto, **Rios sem discurso.**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor José Cândido Stevaux, meu orientador, pela disponibilidade, pelos valiosos ensinamentos e atenção dada ao longo desses quatro anos de pesquisa. Agradeço também a sua generosidade e, acima de tudo, amizade.

Ao professor Aguinaldo Silva que na minha graduação apresentou-me direções acadêmicas que me conduziram ao meu objeto de estudo atual. Sou grato pela atenção, coorientação, ensinamentos, confiança e, principalmente, amizade.

Aos colegas do Laboratório de Estudos do Quaternário – LEQ, Eder Renato Merino, Fabiano Pupim, Renato Guerreiro, Deborah Mendes, pelas dicas e, principalmente, pelo convívio diário que muito me ensinou.

A Eder Merino, pelas conversas, parceria e apoio durante todo o percurso. Colega que desde o mestrado acompanhou-me nas jornadas de coleta de campo no Pantanal, mostrando-se uma pessoa sempre disposta a ajudar. Agradeço também a Edward Lo e Leandro Domingos Luz pelo apoio dado nos trabalhos de campo.

Ao Laboratório de Espectrometria Gama e Luminescência – LEGaL, do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, da Universidade de São Paulo – USP, coordenado pelo professor André Sawakuchi, que possibilitou não só a realização da datação dos depósitos mapeados nesta tese, mas também o treinamento técnico e desenvolvimento científico.

A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, campus do Pantanal, a Ecologia em Ação – ECOA e ao Instituto Acácia pelo apoio dado durante as campanhas de campo.

A Jocemir Antunes, o Jaburu, piloto de barco que nos conduziu aos lugares em que foram feitas as coletas de campo no rio Paraguai.

A Rosangela Vacello, secretária da Pós-Graduação (Geociências e Meio Ambiente) da UNESP Rio Claro, e a Maria, cujo convívio muito me enriqueceu profissionalmente e pessoalmente.

Ao professor Fabiano Tomazini e ao colega Eder Spatti pelo apoio dado nas análises das amostras de água no Laboratório de Geoquímica Ambiental – LAGEA, do Departamento Planejamento Territorial e Geoprocessamento, da Universidade Estadual Paulista – UNESP de Rio Claro.

Ao professor Dr. Fernando H. M. Portelinha por disponibilizar o Laboratório de Mecânica dos Solos e Geotecnia, do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar; e ao técnico Sidnei Muzetti pelo apoio dado na realização dos ensaios de análise granulométrica das amostras de sedimento de fundo do rio Paraguai.

Ao professor Mario Assine pelos ensinamentos e apoio dado a esta pesquisa – cujo recurso financeiro disponibilizado foi primordial à conclusão desta tese. Agradeço por ter aceitado participar da minha banca e também pela valiosa contribuição dada no exame de qualificação e na banca de defesa.

Aos demais membros da banca examinadora: Profa. Dra. Débora Pinto Martins; Prof. Dr. Fabiano do Nascimento Pupim e Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição. Sou grato pela leitura criteriosa do texto e a disponibilidade em participar da banca.

A minha família, em especial, Ane e Pã, pelo convívio diário; com vocês divido meus momentos mais preciosos, meus anseios, meus acertos, enfim, a vida! A minha mãe, Jeanete de Azevedo, por todo ensinamento e amor e por ter zelado pela minha educação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado, a qual me assistiu no período de agosto de 2013 a fevereiro de 2015.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de doutorado (processo 140334/2015-7), de março de 2015 a agosto de 2017. Agradeço também pelo apoio financeiro dado ao projeto de pesquisa "Dinâmica hidrossedimentológica em sistema multicanal herdado no rio Paraguai: um novo paradigma para a geomorfologia fluvial" (processo 443437/2014-9).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa "Mudanças paleohidrológicas, cronologia de eventos e dinâmica sedimentar no Quaternário da Bacia do Pantanal" (processo 2014/06889-2).

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	25
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA .....	29
3. PROBLEMÁTICA DO ESTUDO .....	39
4. OBJETIVOS .....	41
5. COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ .....	43
5.1. Materiais e Métodos .....	44
5.2. Resultados .....	47
5.2.1. Bacia de Inundação.....	49
5.2.2. Paleocinturão de meandros.....	51
5.2.3. Cinturão de meandros.....	54
5.3. Discussão dos Resultados .....	59
5.4. Conclusões.....	64
6. GEOCRONOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DOS COMPARTIMENTOS MAPEADOS.....	67
6.1. Materiais e Métodos .....	67
6.2. Resultados .....	68
6.2.1. Sedimentologia.....	72
6.2.2. Cronologia dos depósitos.....	78
6.3. Discussão dos Resultados .....	79
6.4. Conclusões.....	86
7. DINÂMICA HIDROSSIDIMENTOLÓGICA E ANÁLISE DA GEOMETRIA HIDRÁULICA DA PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ.....	89
7.1. Conceitos e métodos.....	91
7.2. Hidrossedimentologia do sistema Paraguai-Corumbá .....	97
7.2.1. O Regime Hidrossedimentar da planície Paraguai-Corumbá.....	99
7.2.2. Transporte de sedimento no canal e balanço hidrossedimentar .....	107
7.2.3. Vazões de margens plenas, dominante e efetiva e as influências na morfologia do canal.....	129
7.3. Estudos da geometria hidráulica do rio Paraguai .....	133
7.4. Conclusões.....	139
8. ESTUDO PRELIMINAR DA MORFODINÂMICA DE TRECHOS MULTICANAIS NO RIO PARAGUAI .....	141
8.1. Materiais e Métodos .....	143
8.2. Resultados e discussões.....	144
8.2.1. Trecho Ilha Laranjeira .....	144
8.2.2. Trecho Ilha Limoeiro.....	152
8.2.3. Trecho Ilhas do Formigueiro.....	160
8.3. Conclusões.....	172
9. CONCLUSÃO.....	177
REFERÊNCIAS.....	181



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área estudada (retângulo vermelho). .....	30
Figura 2 - Geologia da área estudada.....	32
Figura 3 - Unidades geomorfológicas da área estudada.....	34
Figura 4 - Planície do rio Paraguai ao norte da cidade de Corumbá-MS. ....	35
Figura 5 - Planalto Residual do Urucum-Amolar, visada sul. ....	36
Figura 6 - Gráfico de precipitação média histórica (1941 a 2016) da estação São Francisco (código 2044003), no limite norte da área estudada.....	36
Figura 7 - Descargas médias mensais do rio Paraguai em diferentes localidades, mostrando o deslocamento da onda de cheia.....	37
Figura 8 - Raiz de drenagem do rio Paraguai na área estudada.....	38
Figura 9 - Imagem ótica da área estudada no período seco. ....	45
Figura 10 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área estudada.....	46
Figura 11 - Compartimentação geomorfológica da PFPC.....	48
Figura 12 - Formas canal-elevado que fluem sobre a bacia de inundação do rio Paraguai.....	50
Figura 13 - Canais meandantes com marcas de migração lateral (scroll bars) na bacia de inundação do rio Paraguai. ....	51
Figura 14 - Paleocanais do paleocinturão de meandros. ....	53
Figura 15 - Cortes de meandro reconhecidos no cinturão de meandros do rio Paraguai.....	56
Figura 16 - Trecho do cinturão de meandros que está condicionado por falha leste-oeste na margem da bacia. ....	57
Figura 17 - Cinturão de meandros abandonado truncado pelo cinturão ativo do rio Paraguai (trecho 1).....	58
Figura 18 - Cinturão de meandros atual em seu terceiro trecho, cortando o paleocinturão de meandros. ....	58
Figura 19 - Cinturão de meandros atual, no trecho cinco, truncando o paleocinturão de meandros. ....	59
Figura 20 - Esquema evolutivo da PFPC. ....	63
Figura 21 - Mapa de localização dos testemunhos recuperados. ....	71

Figura 22 - Perfis sedimentares do paleocinturão de meandros.....	74
Figura 23 - Perfis sedimentares dos canais meandrantés na bacia de inundaçãõ. ..	75
Figura 24 - Perfis sedimentares do cinturão de meandros do rio Paraguai. ....	76
Figura 25 - Perfis sedimentares de testemunhos coletados inicialmente com trado manual.....	77
Figura 26 - Localização das seções levantadas em campo e das estações da ANA. ....	90
Figura 27 - Relaçãõ entre a descarga sólida de leito e a velocidade média do fluxo. ....	95
Figura 28 - Relaçãõ cota-vazãõ das três estações fluviométricas ANA.....	98
Figura 29 - Hidrogramas das médias diárias das três estações fluviométricas na área.....	100
Figura 30 - Relaçãõ sedimento-vazãõ. ....	102
Figura 31 - Perfis transversais das estações São Francisco e Porto da Manga. ....	104
Figura 32 - Extravasamento de água da calha do rio Paraguai para a bacia de inundaçãõ. ....	106
Figura 33 - Seções ADCP levantadas em agosto de 2014 (cheia) no rio Paraguai. ....	108
Figura 34 - Seções ADCP levantadas em novembro de 2015 (seca) no rio Paraguai. ....	112
Figura 35 - Trocas sedimentares (carga suspensa) entre canal principal e bacia de inundaçãõ. ....	119
Figura 36 - Balanço sedimentar (carga de leito) do rio Paraguai na cheia (agosto 2014).....	121
Figura 37 - Balanço sedimentar (carga de leito) do rio Paraguai na seca (novembro 2015).....	124
Figura 38 – Balanço sedimentar geral da carga de leito do rio Paraguai (diferença entre cheia e seca). ....	127
Figura 39 - Curvas de permanência das vazões nas estações fluviométricas ANA. ....	131
Figura 40 - Histogramas das descargas sólidas de leito, destacando-se as descargas efetivas (Qef), dominantes (Qd) e de margens plenas (Qbf). ....	132
Figura 41 - Geometria hidráulica na seção transversal (at a station) das três estações fluviométricas na área estudada. ....	134

Figura 42 - Geometria hidráulica a jusante (downstream) para a variável velocidade média, realizada com uso das seções levantadas em campo.....	135
Figura 43 - Geometria hidráulica a jusante (downstream) para a variável largura, realizada com uso das seções levantadas em campo. ....	136
Figura 44 - Geometria hidráulica a jusante (downstream) para a variável profundidade média, realizada com uso das seções levantadas em campo.....	136
Figura 45 - Localização dos trechos multicanais estudados. ....	142
Figura 46 - Batimetria e localização das seções ADCP levantadas na Ilha Laranjeira. ....	145
Figura 47 - Vegetação da ilha Laranjeira. ....	146
Figura 48 - Seções ADCP levantadas no trecho ilha Laranjeira.....	147
Figura 49 - Regime morfodinâmico e estimativa de preenchimento do canal na ilha Laranjeira, de acordo com as taxas de deposição e com a capacidade (toneladas) do canal.....	151
Figura 50 - Ilha Limoeiro em diferentes períodos e condições hidrológicas. ....	153
Figura 51 - Batimetria e localização das seções ADCP levantadas no trecho da ilha Limoeiro.....	154
Figura 52 - Seções ADCP levantadas no trecho da ilha Limoeiro.....	154
Figura 53 - Morfodinâmica e tempo para preenchimento do canal da ilha Limoeiro de acordo com as taxas deposicionais calculadas.....	158
Figura 54 - Imagens orbitais das ilhas do Formigueiro.....	161
Figura 55 - Vegetação arbórea (polígonos brancos) das ilhas Formigueiro. ....	161
Figura 56 - Barra arenosa na cabeceira montante da ilha 1 do arquipélago do Formigueiro. ....	162
Figura 57 - Batimetria e localização das seções realizadas nas ilhas do Formigueiro. ....	163
Figura 58 - Seções ADCP levantadas nas ilhas do Formigueiro.....	164
Figura 59 - Cálculo de volume da barra na cabeceira central da ilha 1 pelo método das seções. ....	168
Figura 60 - Morfodinâmica e tempo para preenchimento do canal nas ilhas do Formigueiro de acordo com as taxas deposicionais calculadas.....	171



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Morfometrias do rio Paraguai usadas para estimativa de vazão média anual. ....	52
Tabela 2 - Parâmetros morfométricos para cada trecho do cinturão de meandros atual do rio Paraguai. ....	55
Tabela 3 - Localização dos testemunhos recuperados na campanha de sondagem. ....	68
Tabela 4 - Taxas de dose das amostras realizadas. ....	69
Tabela 5 - Doses equivalentes e estatística das amostras realizadas. ....	70
Tabela 6 – Idades absolutas das amostras coletadas nos testemunhos recuperados na PFPC.....	78
Tabela 7 - Descargas (líquida e sólida suspensa) das estações São Francisco e Porto da Manga.....	103
Tabela 8 - Quantidade de água e sedimento suspenso transferidos para a bacia de inundação do rio Paraguai. ....	105
Tabela 9 - Características hidráulicas das seções levantadas na cheia (agosto 2014). ....	109
Tabela 10 - Características hidráulicas das seções levantadas na seca (novembro de 2015). ....	113
Tabela 11 - Características sedimentares das seções levantadas em campo (Agosto de 2014). ....	115
Tabela 12 - Características sedimentares das seções levantadas em campo (Novembro de 2015). ....	117
Tabela 13 - Balanço hidrossedimentar do rio Paraguai em agosto de 2014 (cheia). ....	122
Tabela 14 - Balanço hidrossedimentar do rio Paraguai em novembro de 2015 (seca). ....	125
Tabela 16 - Dados hidráulicos das seções levantadas no trecho ilha Laranjeira. ...	147
Tabela 17 - Sedimentologia das seções levantadas no trecho ilha Laranjeira na cheia de 2014. ....	150
Tabela 18 - Sedimentologia das seções levantadas no trecho ilha Laranjeira na seca de 2015. ....	151
Tabela 19 - Dados hidráulicos das seções levantadas no trecho da ilha Limoeiro. ....	156

Tabela 20 - Sedimentologia das seções levantadas na ilha Limoeiro na cheia de 2014.....	156
Tabela 21 - Sedimentologia das seções levantadas na ilha Limoeiro na seca de 2015.....	157
Tabela 22 - Dados hidráulicos das seções levantadas nas ilhas do Formigueiro...	165
Tabela 23 - Sedimentologia das seções levantadas no trecho das ilhas do Formigueiro na cheia de 2014. ....	166
Tabela 24 - Sedimentologia das seções levantadas no trecho das ilhas do Formigueiro na seca de 2015. ....	167
Tabela 25 - Volume e massa da barra na cabeceira montante da ilha 1.....	169

### **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Comparativo entre as áreas estudadas no Pantanal. ....	82
Quadro 2 - Compartimentação do rio Paraguai na área estudada. ....	128

## ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ANA	Agência Nacional de Águas
BAP	Bacia do Alto Paraguai
CBERS	China Brazil Resource Satellite
DRP	Depressão do Rio Paraguai
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
HRC	High Resolution Camera
MDE	Modelo Digital de Elevação
PFPC	Planície Fluvial Paraguai-Corumbá
PRUA	Planalto Residual do Urucum-Amolar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
USGS	United States Geological Survey
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical



MACEDO, H.A. Evolução geomorfológica e dinâmica hidrossedimentar da Planície Fluvial Paraguai-Corumbá, Quaternário do Pantanal. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro-SP, 2017, 193p.

## RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Alto Paraguai (BAP) é constituída por áreas que apresentam características distintas no que concerne aos aspectos tanto biológicos como físicos, tendo o Pantanal como a mais evidente destas e sendo constituído por diversos sistemas hidrogeomorfológicos, com o rio Paraguai como espinha dorsal desses sistemas. As planícies fluviais do rio Paraguai, dentro do Pantanal, possuem dinâmica hidrossedimentar peculiar e grande importância por serem o principal coletor deste imenso trato deposicional. Considerando sua importância e as peculiaridades hidrogeomorfológicas deste sistema, a presente pesquisa visa investigar a evolução quaternária e a dinâmica hidrossedimentar atual da Planície Fluvial Paraguai-Corumbá (PFPC). Para o desenvolvimento deste trabalho, dados de sensoriamento remoto, sedimentológicos e geocronológicos foram utilizados para o estudo da evolução geomorfológica da planície. Dados hidrossedimentares (levantamento em campo e dados secundários) possibilitaram a compreensão da dinâmica hidrossedimentar da área. O mapeamento geomorfológico permitiu identificar três unidades geomorfológicas na área, que possuem feições fluviais deposicionais. A PFPC é composta por cinturões de meandros e rede de paleocanais na bacia de inundação. Paleocinturão de meandros foi reconhecido na PFPC e exibe paleoformas deposicionais que indicam condições hidrossedimentares diferentes das atuais. A bacia de inundação do rio Paraguai apresenta uma drenagem formada por formas canais-elevados. Na porção sul da bacia, esses canais convergem para formar canais meandranes com espiras de meandros semelhantes aos existentes em região mais ao sul do Pantanal. A origem e evolução dessas associações morfológicas estão condicionadas tanto por fatores climáticos como pela configuração da área em relação à bacia hidrográfica. Com base no mapeamento, interpretação dos compartimentos geomorfológicos reconhecidos na área e datações absolutas das formas, esquema evolutivo da geomorfologia da planície foi proposto: 1) Formação de canais-elevados na bacia de inundação do rio Paraguai, durante o Pleniglacial (50 – 20 ka AP); 2) Formação do antigo cinturão de meandros do rio Paraguai, no final do Pleistoceno e início do Holoceno, truncando as formas canal-elevado na bacia de inundação; 3) Com a progressiva melhora climática e aumento das vazões no Holoceno superior, avulsão ocorreu no rio Paraguai na altura da baía do Castelo, construindo seu cinturão atual. As gerações de formas identificadas e mapeadas, que resultaram em um padrão de sobreposição de diferentes estilos fluviais, registram significativas mudanças paleoambientais e paleo-hidrológicas que vêm ocorrendo desde o Pleniglacial. No que diz respeito à dinâmica hidrossedimentológica, levantamentos hidrossedimentares revelaram que a PFPC é um sistema hidrogeomorfológico complexo e peculiar, com perturbações na descarga do rio Paraguai, geradas por pelo menos dois fatores: a configuração geológico-geomorfológica e a hidrologia da área. Ambos propiciam o aparecimento de fenômeno hidrológico ainda pouco estudado no Pantanal: efeito remanso (*backwater effect*), responsável por perturbações nas vazões do rio Paraguai, que tem sua morfodinâmica também alterada.

Palavras-chave: Pantanal. Rio Paraguai. Geomorfologia fluvial. Hidrossedimentologia. Mudanças paleoambientais.



MACEDO, H.A. Evolução geomorfológica e dinâmica hidrossedimentar da Planície Fluvial Paraguai-Corumbá, Quaternário do Pantanal. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro-SP, 2017, 193p.

### **ABSTRACT**

The Upper Paraguay River Basin (UPRB) is constituted by areas with distinctive characteristics, both biological and physical, with the Pantanal being the most evident of these areas and being composed by several hydrogeomorphological systems, with the Paraguay River as the trunk of these systems. The fluvial plains of the Paraguay River within the Pantanal have a peculiar hydrosedimentary dynamics and great importance because they are the main collector of this huge depositional tract. The present research investigates the Quaternary evolution, as well as the current hydro-sedimentary dynamics of the Paraguay River, in the Paraguay-Corumbá River Plain (PFPC). For the development of this research, remote sensing, sedimentological and geochronological data were used. Hydro-sedimentary data (field survey and secondary data) allowed the understanding of the hydro-sedimentary dynamics. Through geomorphological mapping three geomorphological units were identified in the area: 1) The floodbasin of the Paraguay River presents a drainage formed by elevated-channels. On the southern portion of the floodbasin, these channels converge into meandering channels with scroll bars, similar to those present in the southern Pantanal region. The origin and evolution of these morphologies are influenced both by climatic factors and the arrangement of the area relative to the basin; 2) Depositional fluvial landforms composed of abandoned meander belt on the floodbasin. This meander belt shows depositional landforms indicating different hydro-sedimentological conditions; 3) Active meander belt of the Paraguay River. With the inclusion of chronological data, an evolutionary sequence of the geomorphology of the area was proposed: 1) formation of elevated-channels in the Paraguay River floodbasin during the Pleniglacial (50 - 20 ka AP); 2) formation of the former meandering belt of the Paraguay River, at the end of the Pleistocene and early Holocene, truncating the elevated-channel forms in the floodbasin; 3) With the progressive climatic changes and increasing river discharge in the upper Holocene, an avulsion occurred in the Paraguay River near Castelo Bay, and built the current single-channel meander belt. The identified and mapped landforms, which produced overlapping fluvial styles, have recorded paleoenvironmental and paleohydrological changes since the Pleniglacial. Hydro-sedimentary surveys revealed that the Paraguay-Corumbá plain is a complex and peculiar hydro-geomorphological system, with disturbances in the Paraguay River discharge created by at least two factors: 1) The geological-geomorphological arrangement; and 2) The hydrology of the area that facilitate backwater effect, a hydrological phenomenon that is poorly studied in the Pantanal wetland. This phenomenon causes disturbances in the Paraguay River discharge and morphodynamics.

Key-words: Pantanal wetlands. Paraguay River. Fluvial geomorphology. Hydro-sedimentology. Paleoenvironmental changes.



## 1. INTRODUÇÃO

O rio Paraguai deságua no rio Paraná e faz parte da bacia de drenagem do Rio da Prata, que é a quinta maior bacia do mundo e a segunda mais extensa da América do Sul, com área que ultrapassa três milhões de km<sup>2</sup> (REBOUÇAS et al., 2002). A área total da bacia do rio Paraguai é de aproximadamente 1,095 milhões de km<sup>2</sup> e compreende terras do Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

No trecho superior da bacia do rio Paraguai (Bacia do Alto Paraguai – BAP) está localizada uma das maiores áreas úmidas do planeta: o Pantanal. Essa área é um amplo complexo de planícies fluviais periodicamente inundadas, em que o rio Paraguai é o rio-tronco coletor das águas provenientes dos planaltos circundantes. O Pantanal, que é amplamente reconhecido por seus recursos biológicos, é também uma imensa unidade geomorfológica composta por diversos sistemas deposicionais.

O entendimento de que o Pantanal é constituído por um trato de sistemas deposicionais, conjugado ao avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, favoreceu o desenvolvimento de uma nova linha de abordagem aos estudos das características físicas do Pantanal. Essa nova abordagem proporcionou a execução de pesquisas que visavam identificar e caracterizar os sistemas deposicionais do Pantanal.

Dentre as pesquisas realizadas, destacam-se os seguintes estudos nas planícies do rio Paraguai (ASSINE; SILVA, 2009; KUERTEN, 2010; MACEDO et al, 2014; SILVA, 2010; SOUZA, 2004); nos megaleques fluviais (ASSINE, 2005; CORRADINI, 2011; FACINCANI et al, 2006; PUPIM, 2014; ZANI, 2008; ZANI et al, 2009; ZANI et al, 2012; MERINO et al., 2013), e nas planícies interleques (MENDES; ASSINE, 2013; MENDES, 2014; PUPIM et al, 2014; MERINO, 2016). Esses trabalhos significam importantes progressos nas pesquisas realizadas no Pantanal uma vez que incitaram uma série de questionamentos referentes à temas como: modelos hidrogeomorfológicos de sistemas fluviais distributários e meandranes; estilos de canais; incisão fluvial; avulsão; respostas dos sistemas fluviais às mudanças climáticas; e paleo-hidrologia.

Apesar da importante contribuição e relevância dos estudos realizados na planície do rio Paraguai, poucos destes buscaram compreender como o sistema

fluvial responde às mudanças climáticas ocorridas no Quaternário tardio. Desses trabalhos, [Kuerten \(2010\)](#) e [Kuerten et al. \(2013\)](#) estudaram a evolução geomorfológica da planície do rio Paraguai e do megaleque do Nabileque, tanto por meio de dados geocronológicos como com uso de dados palinológicos. [Silva \(2010\)](#) estudou a evolução geomorfológica do megaleque do rio Paraguai em sua entrada no Pantanal norte. Por fim, [Macedo et al \(2014\)](#) mapearam e identificaram paleoformas deposicionais na planície do rio Paraguai na região do município de Corumbá-MS e associaram tais feições às mudanças climáticas do Quaternário tardio. Esse trabalho trouxe importante avanço nos conhecimentos acerca da evolução geomorfológica dessa planície, mas ainda apresenta lacunas de conhecimento devido à falta de controle cronológico para as unidades deposicionais.

Além disso, a dinâmica hidrossedimentar do Pantanal ainda é muito pouco compreendida e a maioria dos estudos são realizados apenas por meio de simulação computacional ([COLLISCHONN et al., 2007](#); [PAZ et al., 2010](#); [BRAVO et al., 2012](#); [PAZ et al., 2014](#); [BRAVO et al., 2014](#)), com cunho estritamente hidrológico, ficando a sedimentologia dos sistemas fluviais relegadas a segundo plano.

Dessa forma, a presente pesquisa tem como proposta a caracterização geomorfológica, sedimentológica e a datação das geoformas localizadas na planície do rio Paraguai, da lagoa Vermelha à confluência do rio Miranda, área atualmente denominada de Planície Fluvial Paraguai-Corumbá (PFPC) e pertencente ao sistema-tronco do Pantanal ([ASSINE et al, 2015a](#)). O trabalho também visa ampliar e melhorar a compreensão da dinâmica hidrossedimentar da PFPC.

Os dados geocronológicos apresentados nesta tese permitiram a investigação de como as mudanças climáticas do Quaternário tardio controlam os processos sedimentares nos sistemas fluviais do Pantanal, adicionando novas informações de geocronologia à escassa base de dados sobre Pantanal. O entendimento do zoneamento geomorfológico e evolução da PFPC forneceu nova informação e compreensão para a dinâmica fluvial e sedimentar do sistema-tronco do Pantanal. As descobertas apresentadas nesta tese evidenciaram a diversidade dos estilos fluviais existentes no Pantanal e sua importância como registro de mudanças climáticas nas terras úmidas da América do Sul.

A tese apresenta um total de oito capítulos. Os primeiros quatro capítulos abordam sobre temas introdutórios e a descrição da área de pesquisa. O capítulo 2

apresenta uma descrição das principais características fisiográficas da área. O terceiro capítulo, as hipóteses que nortearam este estudo. O capítulo 4 expõe os objetivos.

Do quinto capítulo em diante, os resultados da pesquisa são apresentados. O capítulo 5 apresenta o mapeamento geomorfológico da área, com três compartimentos reconhecidos na PFPC. Com base no mapeamento, interpretações foram feitas, as quais possibilitaram a elaboração de um modelo evolutivo da geomorfologia da área. O mapeamento realizado neste capítulo é uma revisão do já realizado em [Macedo et al \(2014\)](#).

O capítulo seguinte aborda questões pertinentes aos depósitos sedimentares e à datação das morfologias mapeadas no capítulo anterior e trata da descrição dos depósitos e da geocronologia dos compartimentos mapeados no capítulo 5.

O capítulo 7 caracteriza a dinâmica hidrossedimentar da PFPC. Dados obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) e levantamentos hidrossedimentares em campo serviram de base para as análises. Juntamente com a análise hidrossedimentológica é apresentada a análise de geometria hidráulica do canal do rio Paraguai.

O último capítulo segue com um estudo mais detalhado da morfodinâmica de trechos multicanais do rio Paraguai na PFPC. Para tanto, três ilhas fluviais foram escolhidas para análise da hidrossedimentologia local. A análise foi realizada com base em levantamentos hidrossedimentares em dois momentos hidrológicos da área (cheia e seca).



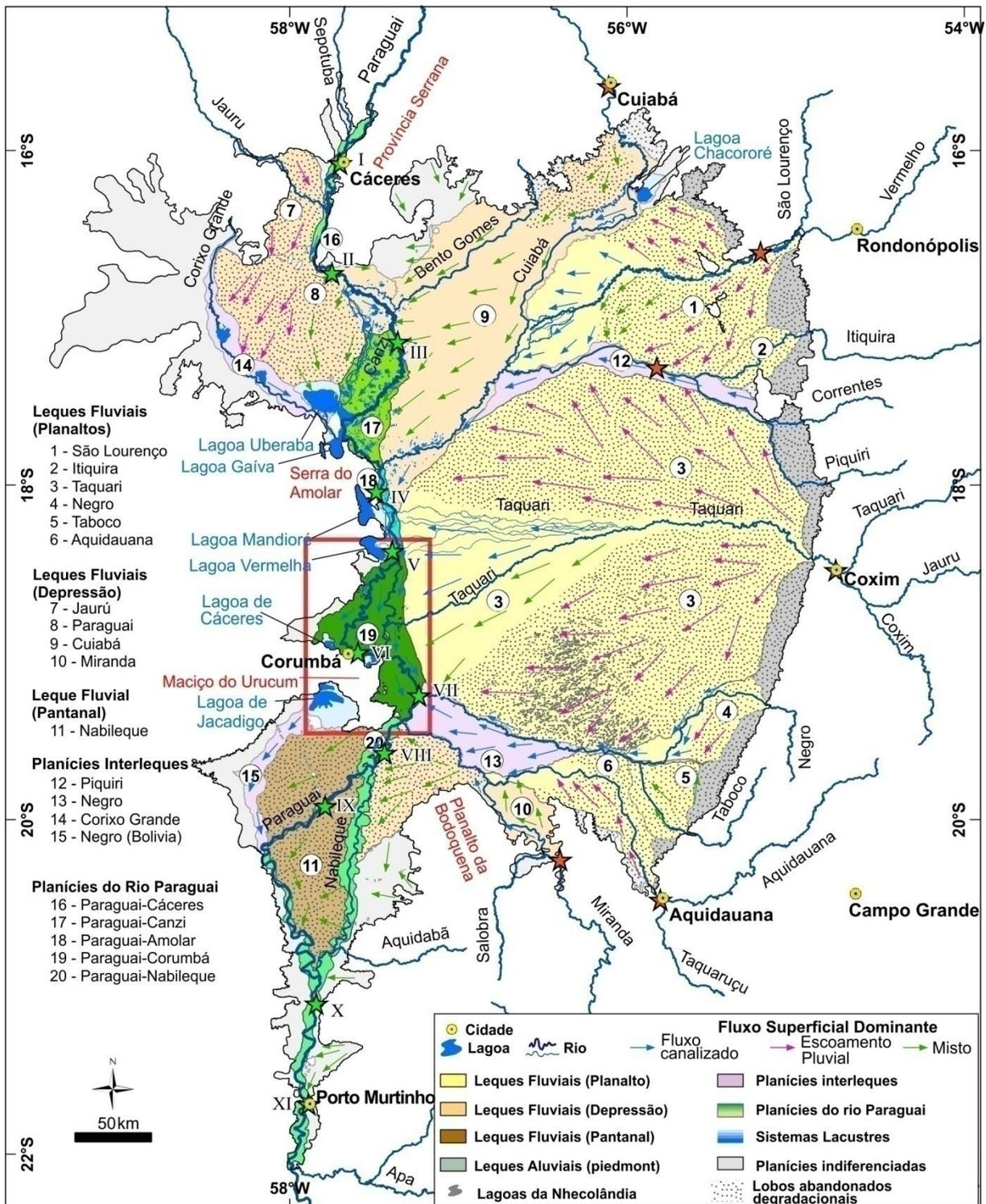
## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA

A área estudada está inserida na Bacia do Alto Paraguai (BAP), onde se encontra alojada a bacia sedimentar do Pantanal. O sistema deposicional moderno forma a maior área alagada (*wetland*) tropical do planeta (ALHO et al, 1988; JUNK et al, 2006; POR, 1995) devido as suas características hidrológicas e geomorfológicas. A sucessão sedimentar da Bacia do Pantanal registra a deposição em uma ampla planície aluvial caracterizada pela interação entre sistemas de megaleques fluviais, planícies interleques e um sistema-tronco. Esses sistemas aluviais são parte de um imenso trato deposicional que reflete a heterogeneidade geomorfológica da bacia (Figura 1).

Esse complexo trato deposicional tem o rio Paraguai como o sistema-tronco, coletor das águas e sedimentos dos demais sistemas que convergem para este rio. O sistema-tronco é composto por planícies fluviais com características hidrossedimentares distintas, em que ora as águas estão confinadas em um vale relativamente estreito, ora o fluxo apresenta hidrologia dispersiva, em que a água do rio Paraguai é espalhada por áreas relativamente largas. As planícies do sistema-tronco compreendem cinco compartimentos distintos, cada um apresentando diferente padrão deposicional e de canal (Figura 1).

A Planície Fluvial Paraguai-Corumbá, foco de análise desta investigação, situa-se no centro do trato deposicional, abrangendo terras do município de Corumbá-MS. A PFPC é a maior planície do sistema-tronco, com aproximadamente 27 km de largura média e 113 km de comprimento (~3.000 km<sup>2</sup>) e aproximadamente 80 % da água drenada pelo Pantanal passa pela PFPC. Esta é marcada por feições geomorfológicas que revelam fenômenos de avulsão e mudanças de padrão fluvial devido às mudanças climáticas que ocorreram na região (MACEDO et al, 2014).

Figura 1 - Localização da área estudada (retângulo vermelho).



Fonte: Modificado de Assine et al, 2015a. As estrelas verdes indicam as estações fluviométricas: I) Cáceres; II) Descalvados; III) Porto Conceição; IV) Amolar; V) São Francisco; VI) Ladário; VII) Porto da Manga; VIII) Porto Esperança; IX) Forte Coimbra; X) Barranco Branco; XI) Porto Murтинho.

O Pantanal é uma bacia tectonicamente ativa e sua origem tem sido associada com o sistema de *foreland* andino (HORTON; DECELLES 1997; USSAMI et al, 1999; CHASE et al, 2009). Essa bacia é caracterizada por várias superfícies de

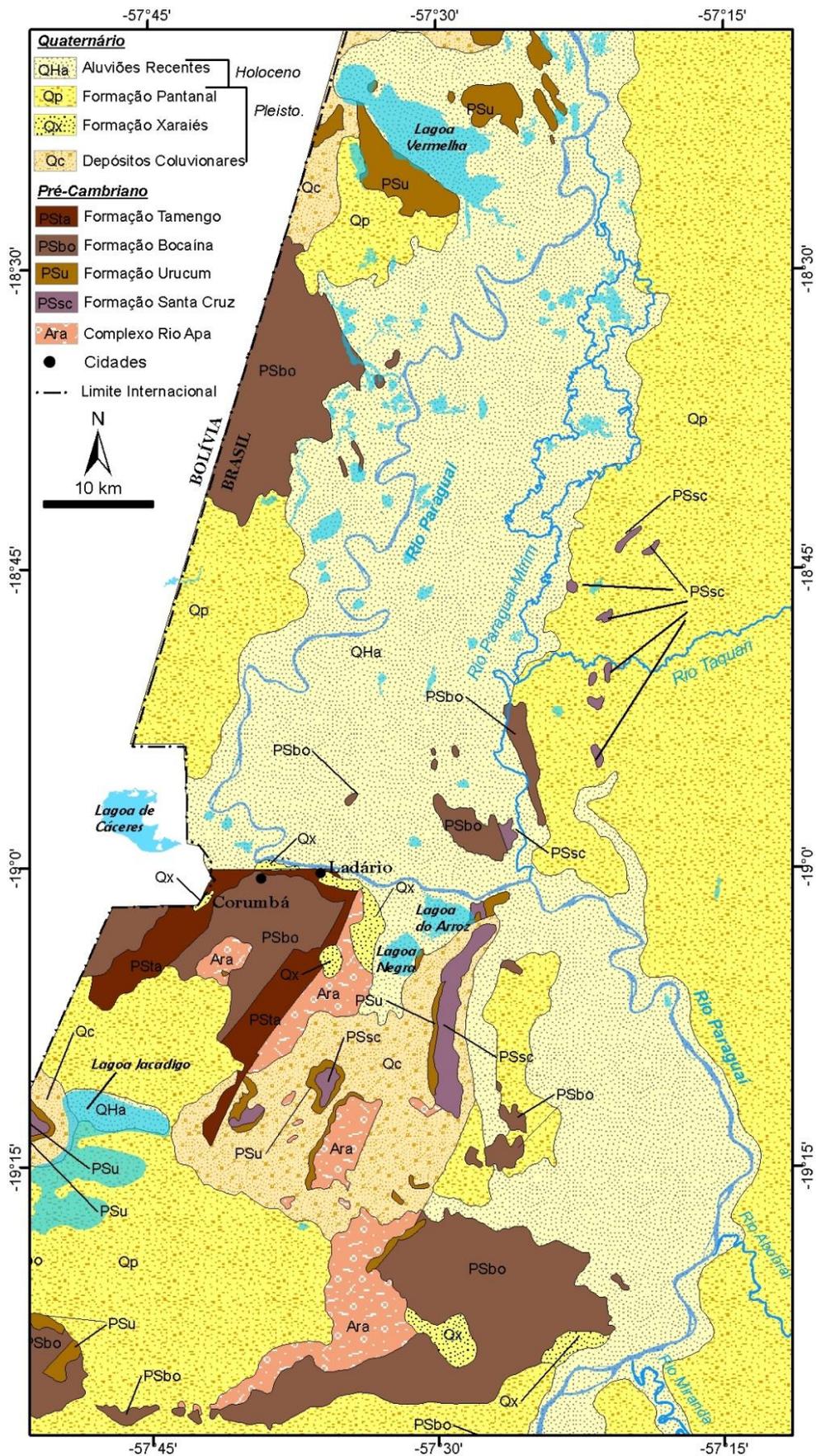
blocos falhados e por uma série de depressões, onde aproximadamente 500 m de sedimentos têm se acumulado durante Quaternário (ASSINE, 2003; ASSINE; SOARES, 2004). Poços perfurados pela Petrobrás na década de 1960 apresentam informações sobre a espessura do pacote de sedimentos da bacia do Pantanal. Os poços indicam que a espessura da bacia é maior em seu centro, com redução de espessura sedimentar nas porções norte e sul, indicando um embaciamento alongado na direção N-S.

A bacia encontra-se sobreposta ao complexo cristalino (xistos, quartzitos, anfibolitos, gnaisses e granitos) aflorante a norte, nordeste, leste e a sul. O embasamento é formado por rochas do Pré-Cambriano que integram a porção meridional do Cráton Amazônico (DEL'ARCO et al, 1982). O Pré-Cambriano é representado pelo Complexo Rio Apa e pelos grupos Corumbá (formações Bocaina e Tamengo) e Jacadigo (formações Urucum e Santa Cruz).

O complexo cristalino compõe fragmentos da História antiga do planeta, que estão espalhados pelo relevo desigual da região, revelados por diferentes litologias e estruturas que configuram o embasamento da Bacia do Pantanal. O embasamento é incorporado na área estudada pelas montanhas e terras altas do maciço do Urucum (morrarias do Urucum, Santa Cruz, Tromba dos Macacos e Rabicho), ao sul da cidade de Corumbá-MS. Esses terrenos elevados, muitas vezes, limitam as planícies do Pantanal e ocorrem como morros, montanhas ou planaltos. Estes são sustentados por formações rochosas do grupo Jacadigo (Figura 2).

O Fanerozóico compreende rochas e sedimentos inconsolidados do Cenozóico e é representado pelas formações Xaraiés e Pantanal, por depósitos coluvionares e por aluviões recentes (Figura 2). Depósitos da Formação Pantanal e de aluviões recentes ocupam a maior parte da área estudada. A Formação Pantanal é constituída por sedimentos arenosos, siltico-argilosos, argilo-arenosos e areno-conglomeráticos, semi-consolidados e inconsolidados. Os aluviões recentes são em grande parte areias quartzosas de granulação fina e fina a média, siltes e argilas (DEL'ARCO et al, 1982).

Figura 2 - Geologia da área estudada.



Fonte: Modificado de Del'Arco et al, 1982.

O Pantanal é uma extensa planície aluvial alojada na Depressão do Rio Paraguai (DRP) e compõe um mosaico de paisagens onde diversos sistemas deposicionais atuam na deposição dos sedimentos provenientes dos planaltos circundantes, formando um imenso trato deposicional em que as características estão intimamente ligadas ao regime hidrológico da região.

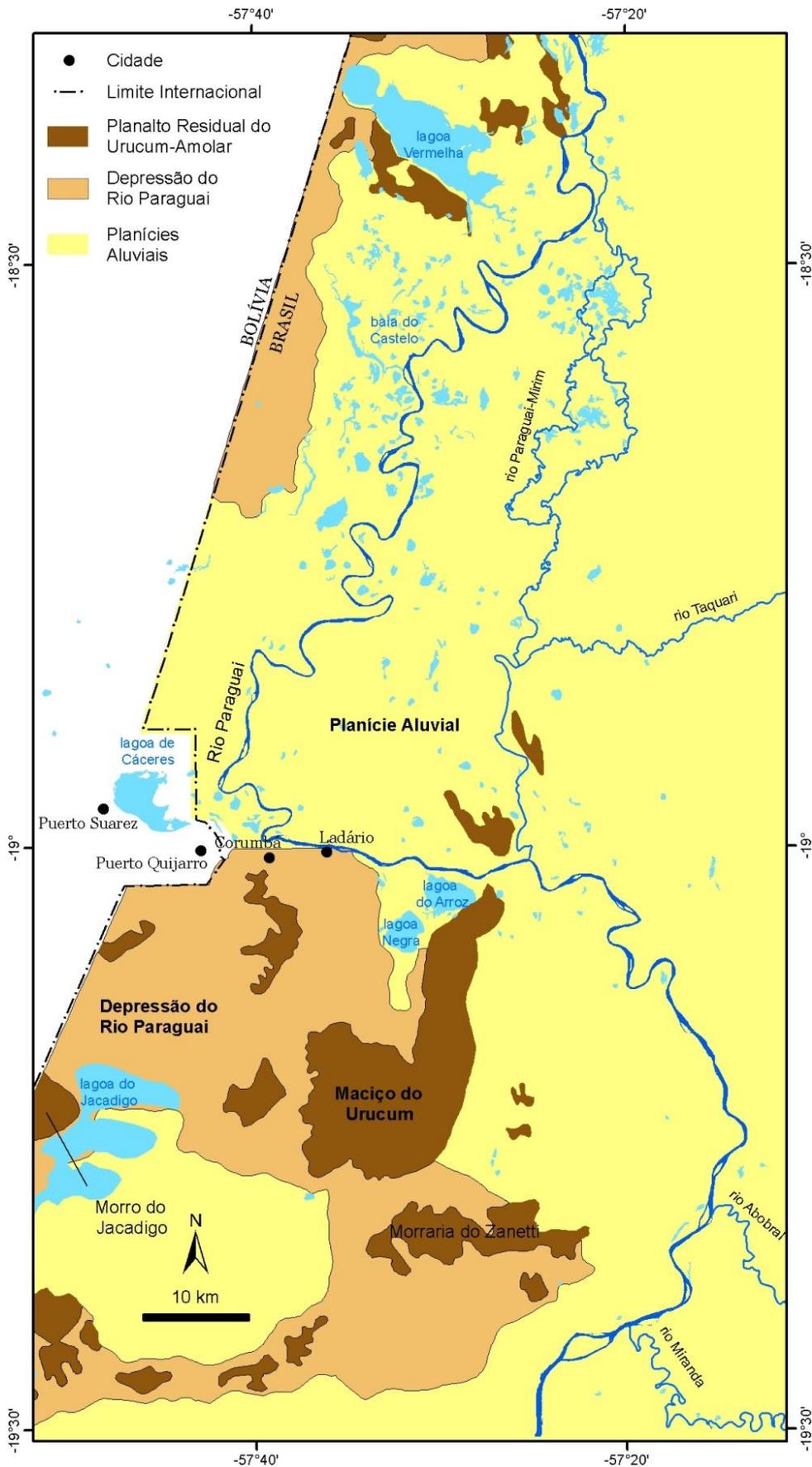
Para se compreender a geomorfologia da planície Paraguai-Corumbá é necessário ter a concepção de que o Pantanal é uma bacia sedimentar ativa, que está sendo preenchida por um grande trato deposicional dominado por sedimentação aluvial, onde o rio Paraguai é o rio coletor das águas de vários leques aluviais ([ASSINE et al, 2005](#)).

Diferentemente de um pântano, o Pantanal é uma extensa área que experimenta prolongada inundação sazonal que se estende de janeiro a junho, mas com picos de inundação máxima em meses distintos para cada compartimento geográfico da planície.

As altitudes do Pantanal variam entre 80 e 190 m acima do nível do mar, caracterizando uma região deprimida circundada por planaltos ([ASSINE, 2003](#)). As planícies do Pantanal compõem parte de uma unidade geomorfológica denominada Depressão do Rio Paraguai, que é circundada pelos planaltos de Maracaju-Campo Grande e Taquari-Itiquira a leste, Guimarães e Parecis a norte, Urucum-Amolar a oeste e Bodoquena a sul.

Três grandes unidades geomorfológicas distintas caracterizam a área estudada: 1) Planalto Residual do Urucum-Amolar (PRUA); 2) Depressão do Rio Paraguai (DRP); 3) Planícies Aluviais (Figura 3). As planícies aluviais são compostas por leques e planícies fluviais. Estas se encontram encaixadas e delimitadas por relevos mais altos formados por rochas pré-cambrianas. Esses relevos são compostos pela Depressão do Rio Paraguai (Figura 4) e por morros residuais que compõem o Planalto do Urucum-Amolar (Figura 5).

**Figura 3 - Unidades geomorfológicas da área estudada.**



Fonte: Modificado de Franco e Pinheiro (1982).

De acordo com [Orioli et al. \(1982\)](#), os solos encontrados no Pantanal são, em quase sua totalidade, compostos por solos hidromórficos, condicionados pela fraca eficiência da drenagem gerando grande tendência a inundações periódicas e prolongadas. Solos do tipo Planossolo Hidromórfico, Gleissolo Háplico, Luvisso Crômico, Planossolo Háplico, Planossolo Nátrico, Plintossolo Háplico e Vertissolo Hidromórfico ocorrem na parte norte do Pantanal. Espodossolo Ferrocárbico, Gleissolo Háplico, Neossolo Quartzarênico, Planossolo Háplico, Planossolo Hidromórfico e Plintossolo Háplico são encontrados na parte central. Planossolo Háplico, Planossolo Hidromórfico, Planossolo Nátrico e Vertissolo Ebânico ocorrem ao sul ([IBGE-EMBRAPA, 2001](#)).

**Figura 4** - Planície do rio Paraguai ao norte da cidade de Corumbá-MS.



Fonte: Foto do autor. A planície encontra-se limitada pela Depressão do Rio Paraguai (primeiro plano), onde está assentada a cidade de Corumbá, trecho o qual o rio encontra-se condicionado por falha (Figura 16).

A precipitação pluviométrica não é uniforme em toda a BAP, que apresenta precipitação média anual de 800 mm em algumas regiões da fronteira entre o Brasil e Bolívia e quase de 2000 mm em algumas áreas ao norte da bacia ([CLARKE et al., 2003](#)). Na região da cidade de Corumbá a precipitação é de 1.000 mm/ano, tendo a parte boliviana da bacia precipitação de 800 mm/ano. A precipitação nos rios de cabeceira não é homogênea e varia de 1.200 a 1.875 mm no norte-nordeste, e 710-1.200 mm no sul-sudoeste da BAP ([ASSINE et al, 2015b](#)). A maior parte da chuva anual ocorre de novembro a março, sendo que abril a setembro é o período mais seco ([MARENGO et al, 2015](#)).

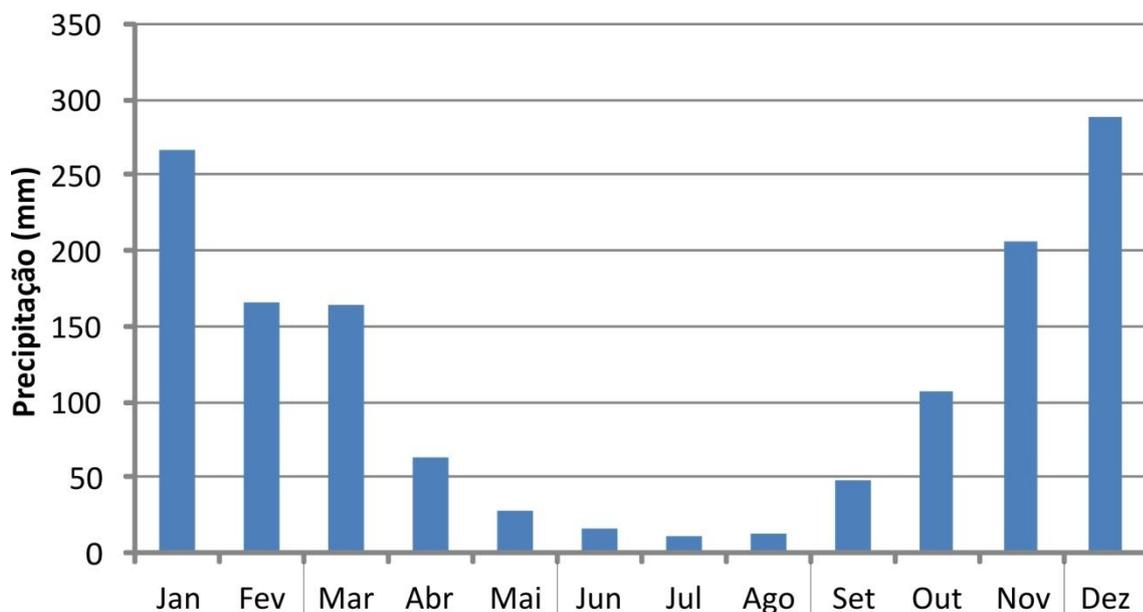
**Figura 5** - Planalto Residual do Urucum-Amolar, visada sul.



Fonte: Foto do autor. A Depressão do Rio Paraguai está em primeiro plano. Morro do Urucum aparecendo em segundo plano, tendo o morro Santa Cruz ao fundo no canto esquerdo (foto tirada na BR-262).

O regime hidrológico da área é influenciado pelo tipo climático que, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo “AW”, definido como clima tropical úmido e seco, ou clima tropical de savana e, embora as temperaturas possam variar de  $-1^{\circ}\text{C}$  a  $41^{\circ}\text{C}$ , a temperatura média é de  $20^{\circ}\text{C}$  em julho e  $27^{\circ}\text{C}$  em dezembro (MARENGO et al, 2015; KREPPER et al, 2006). Esse clima possui duas estações bem definidas, sendo uma chuvosa, de novembro a março, e outra seca, de abril a setembro (Figura 6).

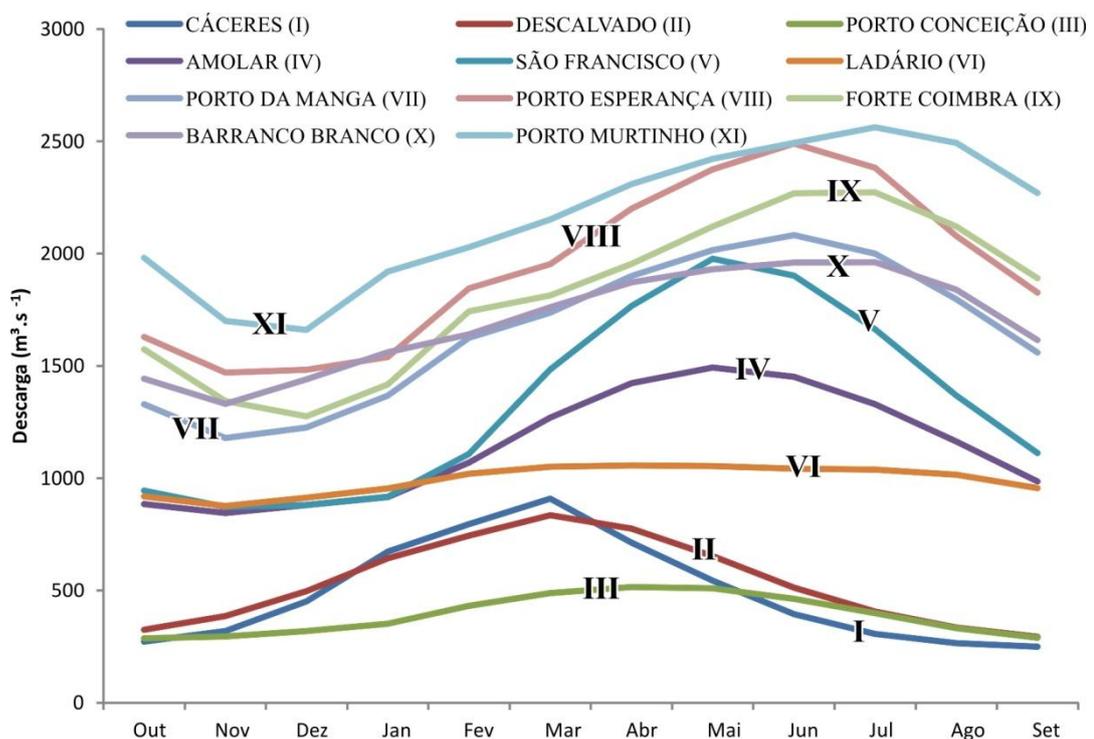
**Figura 6** - Gráfico de precipitação média histórica (1941 a 2016) da estação São Francisco (código 2044003), no limite norte da área estudada.



Fonte: Dados da Agência Nacional de Águas – ANA – Hidroweb.

Defasagem no pico de inundação ocorre de norte para sul, devido à distribuição irregular das chuvas e ao baixo gradiente da planície. A onda de cheia demora aproximadamente quatro meses para atravessar todo o Pantanal, da entrada do rio Paraguai, na altura da cidade de Cáceres-MT, até sua saída a sul de Corumbá-MS, em área conhecida como Pantanal do Nabileque (Figura 7). Flutuações interanuais e interdecadais na intensidade, duração e magnitude da onda de cheia são moduladas por fenômenos de escala continental, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (NOBRE; SHUKLA, 1996; LENTERS, COOK; 1999; THOMPSON et al, 2000; MARENGO et al, 2001).

**Figura 7** - Descargas médias mensais do rio Paraguai em diferentes localidades, mostrando o deslocamento da onda de cheia.



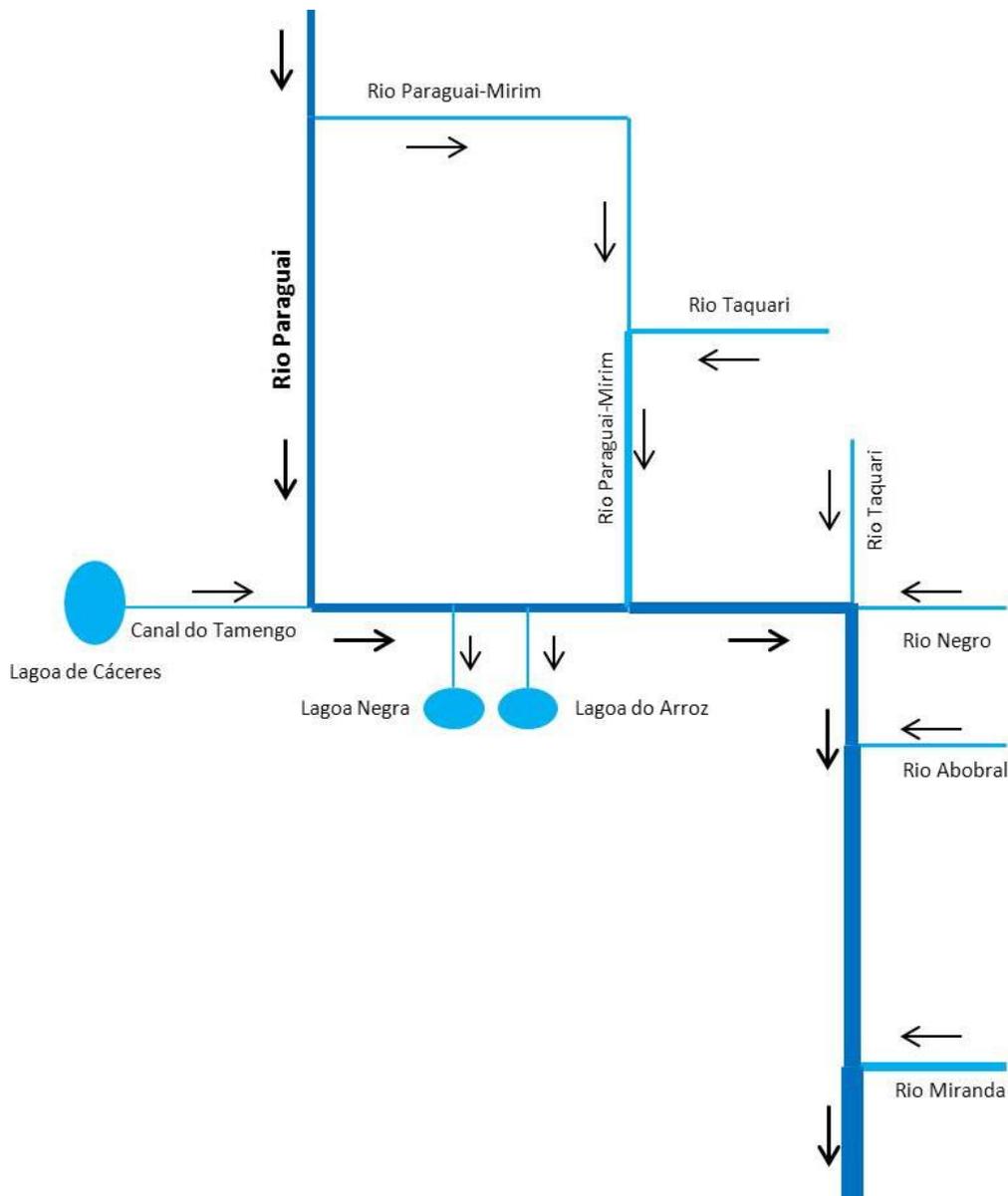
Fonte: Elaborado pelo autor. Localização das estações fluviométricas (algarismos romanos) na Figura 1.

A distribuição da precipitação anual é controlada pela monção de verão da América do Sul (*South America Summer Monsoon – SASM*), levando a fortes chuvas convectivas no verão austral e condições marcadamente secas durante o inverno. Uma muito profunda baixa continental se forma sobre a região do Chaco durante o verão austral e força os ventos de Nordeste sobre a Amazônia deslocarem-se para o sul, transportando grandes quantidades de umidade que alimenta as tempestades

convectivas do verão sobre as planícies subtropicais até as latitudes 35° S (GARREAUD et al ., 2009).

O rio Paraguai, na área estudada, recebe contribuição de seis afluentes: canal do Tamengo, Paraguai-Mirim, Taquari, Negro, Abobral e Miranda (Figura 8). O sistema de drenagem é do tipo tributário, em que o rio aumenta sua vazão de montante para jusante. Nos períodos de cheia esse sistema é afetado pela perda de água para a bacia de inundação, que retém a água em regiões deprimidas formando inúmeros pequenos lagos, ocasionando, em alguns locais, diminuição da vazão para jusante.

**Figura 8** - Raiz de drenagem do rio Paraguai na área estudada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3. PROBLEMÁTICA DO ESTUDO

A Planície Fluvial Paraguai-Corumbá apresenta diversas formas de relevo deposicional que registram mudanças paleoambientais e paleo-hidrológicas ocorridas na bacia do Pantanal. Um dos principais registros é o paleocinturão de meandros existente na bacia de inundação da PFPC. Trabalhos realizados na PFPC mostraram que esse paleocinturão representa o antigo cinturão de meandros do rio Paraguai, que sofreu avulsão nas proximidades da baía do Castelo e passou a escoar na direção SSW até encontrar a margem da bacia, próximo a Corumbá-MS (MACEDO et al., 2014).

Até o presente momento não se sabe ao certo quando a avulsão ocorreu e quais foram as causas deste fenômeno. No entanto, estima-se que a avulsão foi provocada por aumento da descarga fluvial, precedido de maior aporte sedimentar que ocasionou a agradação do antigo vale do rio Paraguai, evento este regido por mudanças climáticas relativas aos estádios glaciais. Supõe-se também que a avulsão ocorreu na transição do Pleistoceno para o Holoceno (op. cit).

No presente trabalho, assume-se como hipótese que a avulsão ocorreu no intervalo de tempo do Holoceno inferior/médio, momento de oscilação climática com flutuações na umidade da região. Após avulsão, o canal se estabeleceu no atual curso com direção SSW, passando a entalhar seu antigo cinturão, fluindo em canal único no Holoceno superior. A avulsão se deu devido aos efeitos que o paleoclima provocou no sistema fluvial e na produção de sedimentos na bacia.

Além das questões relacionadas à evolução geomorfológica, as características hidrológicas da área chamam atenção por sua peculiaridade. Em períodos de águas baixas o sistema possui comportamento hidrológico tributário com aumento da vazão a jusante. Na cheia, a descarga do rio Paraguai é afetada pela perda de água do canal para a planície e decréscimo na vazão a jusante é registrado, porém, apenas a perda de água para a planície não explica satisfatoriamente a relação cota X vazão que a estação fluviométrica de Ladário apresenta. Diante disso, pergunta-se: quais outros mecanismos hidrológicos estão presentes no sistema PFPC? Qual fenômeno hidrológico poderia causar o comportamento anômalo existente na relação cota X vazão da estação Ladário?

Sobre essas questões, acredita-se que as características geológico-geomorfológicas da área causam perturbações na hidrologia do rio Paraguai. Toda a configuração da área provocaria fortes perturbações, tanto na hidráulica, como na sedimentologia do rio Paraguai, em que a hidrossedimentologia varia de acordo com período hidrológico. Assim, supõe-se que um intenso efeito remanso ocorre na área e que esse fenômeno é causado tanto pela geologia como pela hidrologia da área, tendo, provavelmente, seu enchimento ocorrendo de jusante para montante.

#### 4. OBJETIVOS

Tendo em vista os apontamentos discutidos anteriormente, tanto em relação à geomorfologia quanto à hidrossedimentologia da área estudada, esta tese teve como objetivo: a elaboração do modelo evolutivo da geomorfologia da área e do modelo hidrogeomorfológico da PFPC.

São objetivos específicos: 1) Delimitação da Planície Fluvial Paraguai-Corumbá; 2) Identificação e mapeamento de formas e paleoformas deposicionais na PFPC; 3) Reconhecimento de evidências de mudanças paleoambientais e paleo-hidrológicas; 4) Caracterização dos depósitos sedimentares dos diferentes compartimentos geomorfológicos, buscando diferenciar depósitos pleistocênicos de holocênicos; 5) Datação dos compartimentos geomorfológicos existentes na área e estabelecimento do momento geológico em que ocorreu a avulsão fluvial do rio Paraguai; 6) Estabelecimento do modelo evolutivo da geomorfologia da planície e das mudanças paleoambientais e paleo-hidrológicas ocorridas na área; 7) Caracterização de aspectos da hidrossedimentologia atual do rio Paraguai, visando à compreensão da interação canal-planície e dos processos deposicionais, tanto no canal como na planície; 8) Caracterização da hidrossedimentologia dos trechos multicanais do rio Paraguai, nas ilhas escolhidas; 9) Determinação da morfodinâmica e das taxas sedimentares dos trechos multicanais nas ilhas escolhidas para a análise.

Os trabalhos realizados e resultados alcançados são apresentados nos capítulos 5, 6, 7 e 8, os quais serão transformados em artigos para publicação. O detalhamento dos métodos e materiais utilizados, bem como os trabalhos realizados, estão nos referidos capítulos.

Os resultados referentes aos objetivos 1 a 3 fazem parte do capítulo 5, que possui como tema a compartimentação geomorfológica da PFPC. Os objetivos 4 a 6 são resultados do capítulo 6, cujo tema é a geocronologia da PFPC. Os últimos objetivos integram os capítulos 7 e 8, que têm como tema a caracterização de aspectos da hidrossedimentologia atual do rio Paraguai.



## 5. COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ

O Pantanal é um sistema hidrogeomorfológico bastante complexo, com funcionamento hidrológico peculiar, que determina a forma como o trato de sistemas deposicionais funciona. As áreas mais próximas da fonte sedimentar são compostas, em sua maioria, por sistemas de leques fluviais (ASSINE et al., 2005; CORRADINI, 2011; FACINCANI et al., 2006; PUPIM, 2014; ZANI, 2008; ZANI et al., 2009; ZANI et al 2012) que retêm aproximadamente 90% do sedimento que entra no Pantanal (ASSINE et al, 2015a). Localizado entre esses sistemas estão as planícies interleques que funcionam como região de *by-pass* sedimentar, transferindo sedimento para o sistema tronco: o rio Paraguai.

O rio Paraguai, dentro desse trato, desenvolve-se em um mosaico de sistemas de planícies fluviais que possuem características diversas, desde cinturão de meandros confinados a planícies aluviais não-confinadas, com drenagem *anabanching* (ASSINE et al, 2015a,b). Essas características estão presentes na área estudada, em que o rio Paraguai flui num cinturão de meandros entalhado em sedimentos mais antigos de uma ampla planície fluvial marcada por evidências de mudanças de estilo fluvial. A PFPC é uma ampla planície aluvial composta de depósitos holocênicos (aluviões recentes) e pleistocênicos (Formação Pantanal). Essa planície é delimitada por relevos residuais mais elevados (planaltos e superfícies de aplainamento) que compõe o complexo cristalino de idade pré-cambriana.

Diversas formas de relevo compõem a PFPC, que é dominada por cinturões de meandros e planície aluvial com inúmeros pequenos lagos, além de formas de terreno relictas que evidenciam mudanças na hidrologia do sistema. Embora ainda pouco estudada, a PFPC é a maior planície fluvial que compõe o sistema tronco do Pantanal, com largura média de 27 km (ASSINE et al., 2015b). A planície está situada na porção central do Pantanal (Figura 1) e mais de 80 % da água drenada no Pantanal passa nesse trecho do rio Paraguai. Essa ampla planície fluvial é abruptamente fechada na confluência com o rio Miranda, configuração esta que causa perturbações no regime hidrológico do sistema (ver capítulo 7).

Neste capítulo, uma revisão e reinterpretação das formas de terreno presentes na agora denominada PFPC foi realizada, com foco na análise de

morfologias que registrem mudanças paleoambientais e paleo-hidrológicas ocorridas na planície. O objetivo aqui é apresentar uma nova leitura da geomorfologia da área com base em dados de sensoriamento remoto com melhor resolução espacial e também com relação aos dados de geocronologia que serão apresentados no capítulo seguinte.

### **5.1. Materiais e Métodos**

Para a revisão da geomorfologia da PFPC foram utilizados os mesmos dados de sensores remotos utilizados no trabalho realizado por [Macedo et al, 2014](#) (Imagem Landsat 7 ETM+, do período de seca, cena 227/73 de novembro de 2003 – Figura 9; imagens HCR CBERS 2B – Figura 14; dados altimétricos SRTM com resolução espacial de 30 metros, obtidos pela interpolação TOPODATA – Figura 10). Além dos dados utilizados anteriormente, também foram utilizadas imagens do Google Earth e imagens RapidEye (Figura 13).

Os mesmos procedimentos do trabalho anterior ([op.cit.](#)) foram adotados neste trabalho: as imagens óticas e MDE foram mosaicados e recortados conforme os limites da área estudada e o MDE da área foi gerado pela redução dos intervalos de classes altimétricas para ressaltar as formas do terreno. Após o processamento dos dados, os produtos (composição colorida e o MDE) foram analisados para identificação das morfologias existentes. Primeiramente, as áreas acima da planície foram delimitadas, ou seja, Planalto do Urucum-Amolar e Depressão do Rio Paraguai. Em seguida, as formas do terreno identificadas na planície do rio Paraguai foram delimitadas.

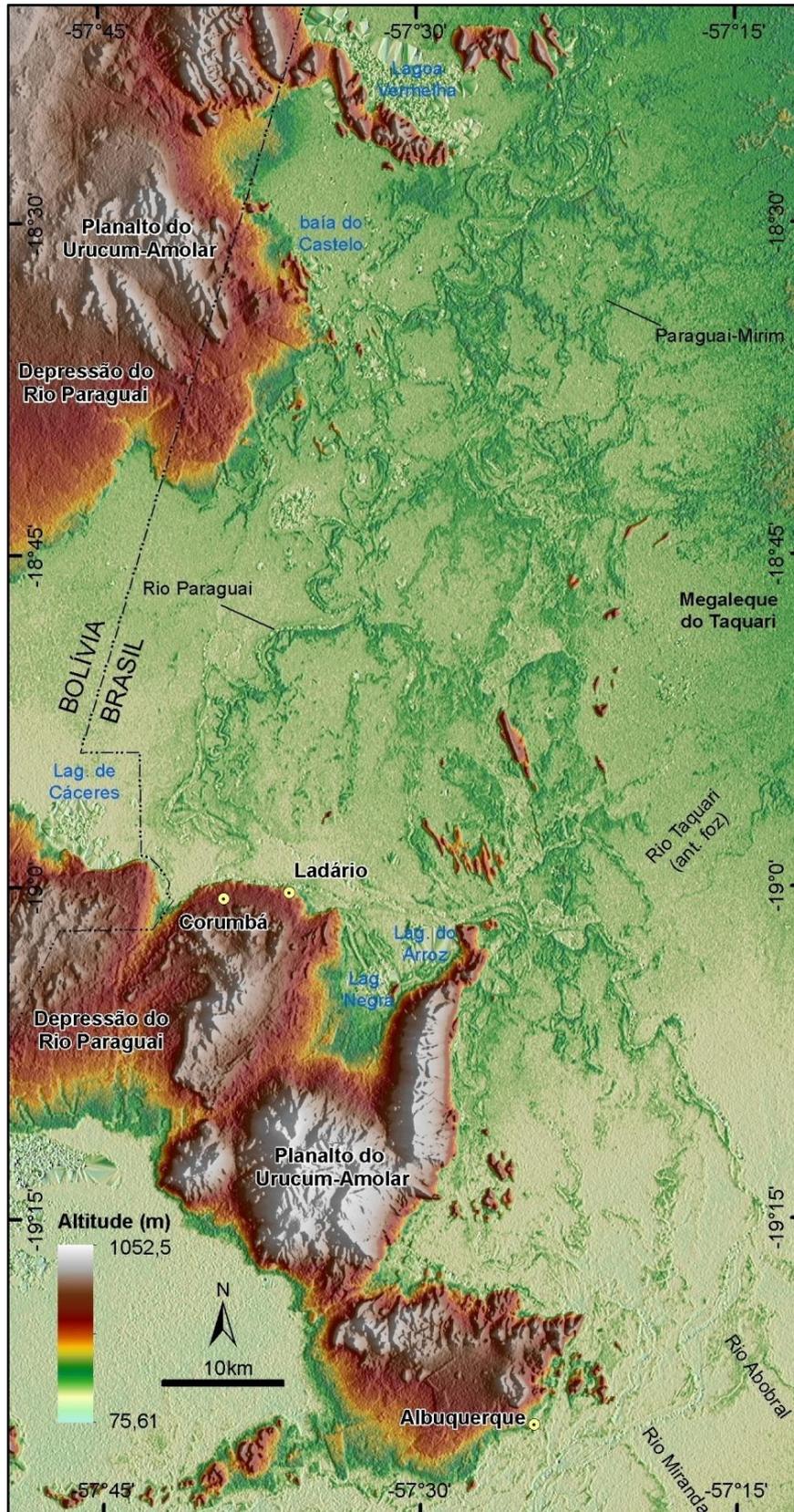
Os critérios para delimitação dos compartimentos foram o reconhecimento de elementos morfológicos característicos de cada compartimento. Os limites entre as planícies aluviais e os relevos mais elevados foram definidos pelas diferenças altimétricas visualizadas no MDE e pela diferença de textura reconhecida na imagem ETM+. Os compartimentos da PFPC foram delimitados pela diferença de textura observada nas imagens óticas (composição RGB) e pelo desnível altimétrico reconhecida no MDE.

**Figura 9** - Imagem ótica da área estudada no período seco.



Fonte: Imagem Landsat 7 ETM+ R6G3B5, novembro de 2003.

Figura 10 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área estudada.



Fonte: TOPODATA – Banco de dados Geomorfométricos do Brasil.  
Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

## 5.2. Resultados

Três compartimentos geomorfológicos foram mapeados na PFPC, que é limitada por planícies aluviais adjacentes e por relevos aplainados da Depressão do Rio Paraguai e por relevos montanhosos do Planalto Residual do Urucum-Amolar.

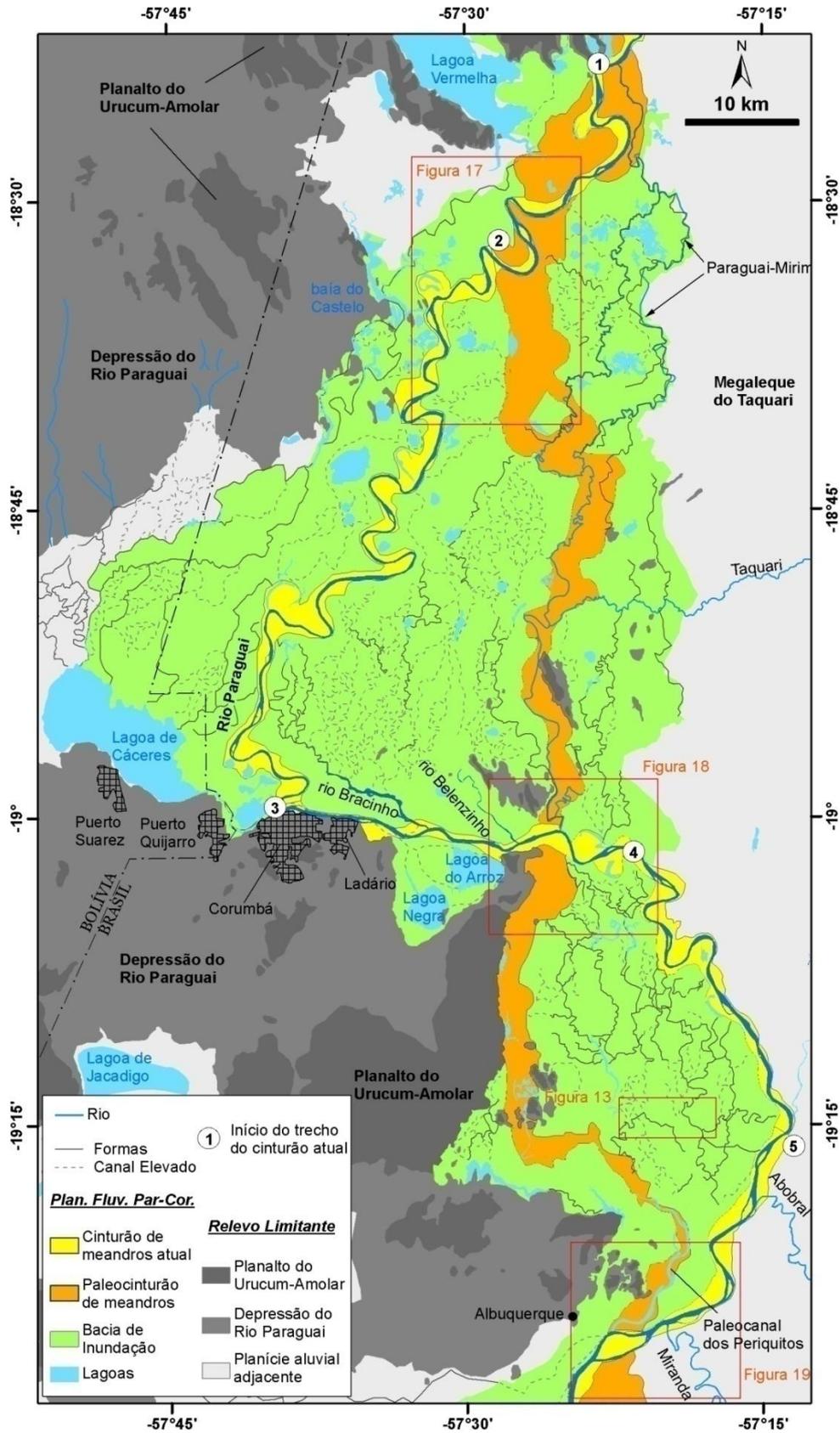
A PFPC é constituída por compartimentos geomorfológicos, que registram mudanças paleogeográficas ocorridas na área. Esse sistema é formado por diversos elementos geomorfológicos, como lagoas, rios, corixos, vazantes, paleocanais, espiras de meandro etc. Os principais compartimentos reconhecidos na PFPC são: a) bacia de inundação; b) paleocinturão de meandros; c) cinturão de meandros (Figura 11).

O limite entre as planícies aluviais e o embasamento da bacia foi mais bem visualizado pelo MDE. A bacia de inundação do rio Paraguai foi definida pelo reconhecimento de formas do terreno que tenham relação genética com rio Paraguai (atual e pretérito), o que a diferencia de outras planícies (planícies aluviais adjacentes), as quais recebem contribuição direta de drenagens oriundas dos relevos mais elevados (Depressão do Rio Paraguai) ou de tributários do rio Paraguai (Taquari, Negro, Abobral e Miranda).

A descrição dos compartimentos reconhecidos na PFPC foi previamente apresentada por [Macedo \(2013\)](#) e [Macedo et al. \(2014\)](#). Segundo os autores, a PFPC é delimitada por planícies aluviais adjacentes e por relevos residuais, e sua superfície é marcada por morfologias que mostram mudanças paleo-hidrológicas ocorridas na área e que foram construídas desde o Pleistoceno tardio.

O limite da bacia de inundação do rio Paraguai apresentado neste texto, que envolve o paleocinturão e o cinturão de meandros do rio Paraguai, não foi modificado em relação ao do trabalho realizado anteriormente ([op. cit.](#)). Contudo, os limites dos paleocinturões foram alterados e alguns braços dessa morfologia foram retirados da compartimentação. O paleocinturão que inicialmente foi interpretado como uma morfologia multicanal ([op. cit.](#)) é agora entendido como um sistema de canal único.

Figura 11 - Compartimentação geomorfológica da PFPC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As alterações no paleocinturão são atribuídas à releitura das imagens orbitais e ao uso de produtos de sensoriamento remoto com melhor resolução espacial (Google e RapidEye), os quais possibilitaram o reconhecimento mais detalhado das paleoformas; e aos dados de geocronologia das formas (capítulo 6) que permitiram identificar diferenças de idades entre os braços do paleocinturão reconhecidos anteriormente. Os canais que nos trabalhos anteriores foram interpretados como sendo parte do paleocinturão de meandros são, neste trabalho, interpretados como canais meandrantés pertencentes à bacia de inundação. Isso decorre tanto pelas diferenças na morfologia, quanto a diferença de idade das formas.

Destaca-se a existência de paleoformas compostas de canais com diques marginais em quase toda a PFPC. O paleocinturão de meandros representa o mais importante registro de mudança paleo-hidrológica desta planície. Esse cinturão de meandros abandonado evidencia mudança ocorrida no rio Paraguai, produto de avulsão do rio na latitude da baía do Castelo.

#### 5.2.1. Bacia de Inundação

A bacia de inundação (*floodbasin*) é uma superfície extremamente plana, que favorece o acúmulo de água. A inundação é condicionada pelo transbordamento das águas da calha do rio Paraguai nos períodos de cheia. Em período chuvoso mais prolongado pode acontecer de a inundação iniciar pela subida do freático antes mesmo das águas do rio transbordarem.

Diferentemente de uma planície de inundação (*floodplain*), que possui sua formação diretamente ligada a processos morfológicos do rio que a constrói (erosão-deposição marginal e depósitos de *overbank*, formando o cinturão de meandros do rio), uma bacia de inundação é uma área adjacente ao cinturão de meandros desse rio e é formada principalmente por deposição de sedimentos finos (silte e argila), resultante de processos de acreção vertical durante as cheias.

A bacia de inundação apresenta drenagem pouco eficiente e lagoas. A drenagem desse compartimento geomorfológico é conhecida localmente como corixos e vazantes. Formas canal-elevado são reconhecidas na bacia de inundação do rio Paraguai. Essas formas apresentam canais com diques marginais visíveis nas imagens e MDE, fluindo sobrepostos à bacia de inundação (Figura 12). As formas canal-elevado são construídas por canais que fluem em cota topográfica mais

elevada que a bacia de inundação. São canais que sofrem agradação de seu leito (fundo e margem), pelo processo de deposição da carga detrítica. A acreção do dique marginal se dá pela deposição do sedimento suspenso, no momento em que ocorre transbordamento das águas que esses canais transportam.

**Figura 12** - Formas canal-elevado que fluem sobre a bacia de inundação do rio Paraguai.



Fonte: foto de Aguinaldo Silva (15/06/2014). À esquerda tem-se imagem Landsat 7 ETM+ (R6G3B5). À direita, canal-elevado fluindo acima da bacia de inundação que está inundada.

O processo de enchente, muitas vezes, acaba obliterando formas existentes na bacia de inundação, contudo, ao analisar as imagens, rede de drenagem formada por formas canal-elevado foi identificada (Figura 11). Essa rede de drenagem é truncada pelos cinturões de meandros.

Na porção mais meridional da PFPC, os canais existentes na bacia de inundação convergem para formar canais maiores. Os canais dessa região apresentam marcas de migração lateral (*scroll bars*) que podem levar a interpretação de que esses canais compõem um paleocinturão de meandros (Figura 13). No entanto, uma análise mais atenta dessas formas mostrou que esses canais meandantes apresentam características que destoam daquelas apresentadas pelo paleocinturão que está encaixado na bacia de inundação.

**Figura 13** - Canais meandranes com marcas de migração lateral (scroll bars) na bacia de inundação do rio Paraguai.



Fonte: Imagem RapidEye R1G2B3.

Planícies adjacentes limitam a bacia de inundação do rio Paraguai, a oeste, leste (megaleque do Taquari) e a sul (confluências do rio Abobral e Miranda). Essas planícies diferenciam-se da bacia de inundação do rio Paraguai pela influência que sofrem de outros rios. Na porção oeste da área estudada, a bacia de inundação é limitada por planícies que são alimentadas por drenagens oriundas da Depressão do Rio Paraguai e das águas das lagoas Vermelha e Cáceres. A porção leste da bacia de inundação está delimitada pelo megaleque do Taquari, e a sul pelas planícies aluviais dos rios Negro, Abobral e Miranda. As planícies limitantes da bacia de inundação do rio Paraguai foram denominadas de planícies aluviais adjacentes.

### 5.2.2. Paleocinturão de meandros

Um paleocinturão de meandros foi reconhecido na imagem ótica e no MDE. Essa morfologia possui sentido N-S e contorna relevos residuais do embasamento da bacia, sendo composto por espiras de meandro, paleocanais e lagoas alongadas. No mapeamento realizado anteriormente (MACEDO et al., 2014), três paleocinturões (I, II e III), que se bifurcavam e contornavam relevos residuais de rochas pré-cambrianas existentes na área, foram individualizados, sendo o paleocinturão II o que apresentava formas deposicionais mais bem preservadas e, por isso, o mais facilmente identificável e mapeável dos três.

Uma análise mais atenta, com novos dados de sensoriamento remoto dos demais braços (I e III) mapeados anteriormente, mostrou que estes não fazem parte do paleocinturão. Essa alteração no mapeamento foi necessária, pois foram

percebidas diferenças morfológicas entre os braços do paleocinturão. Diferentemente do braço II, os outros braços estão bastante obliterados e estes não se encontram encaixados (incisos) na bacia de inundação (Figura 13). Outra constatação importante refere-se às idades dos braços, em que o braço II, mapeado no trabalho anterior, é bem mais jovem que os canais meandringes mapeados na bacia de inundação (ver capítulo 6).

Equação para estimativa de vazão do rio Paraguai atual foi definida com base em medidas de largura de canal, de cordas de arco do meandro e vazão do rio Paraguai. A vazão do rio Paraguai, em seu trecho superior (entre as seções 34 e 25 – ver capítulo 7), pode ser estimada, com precisão de  $\pm 8,41 \text{ m}^3/\text{s}$ , a partir da seguinte expressão:  $y = -0,11056x_1 + 0,728813x_2 + 1.503,904$  [eq.1]; em que  $y$  é a vazão média anual em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $x_1$  é a comprimento da corda de arco do meandro em metros; e  $x_2$  é a largura média do canal em metros (Tabela 1).

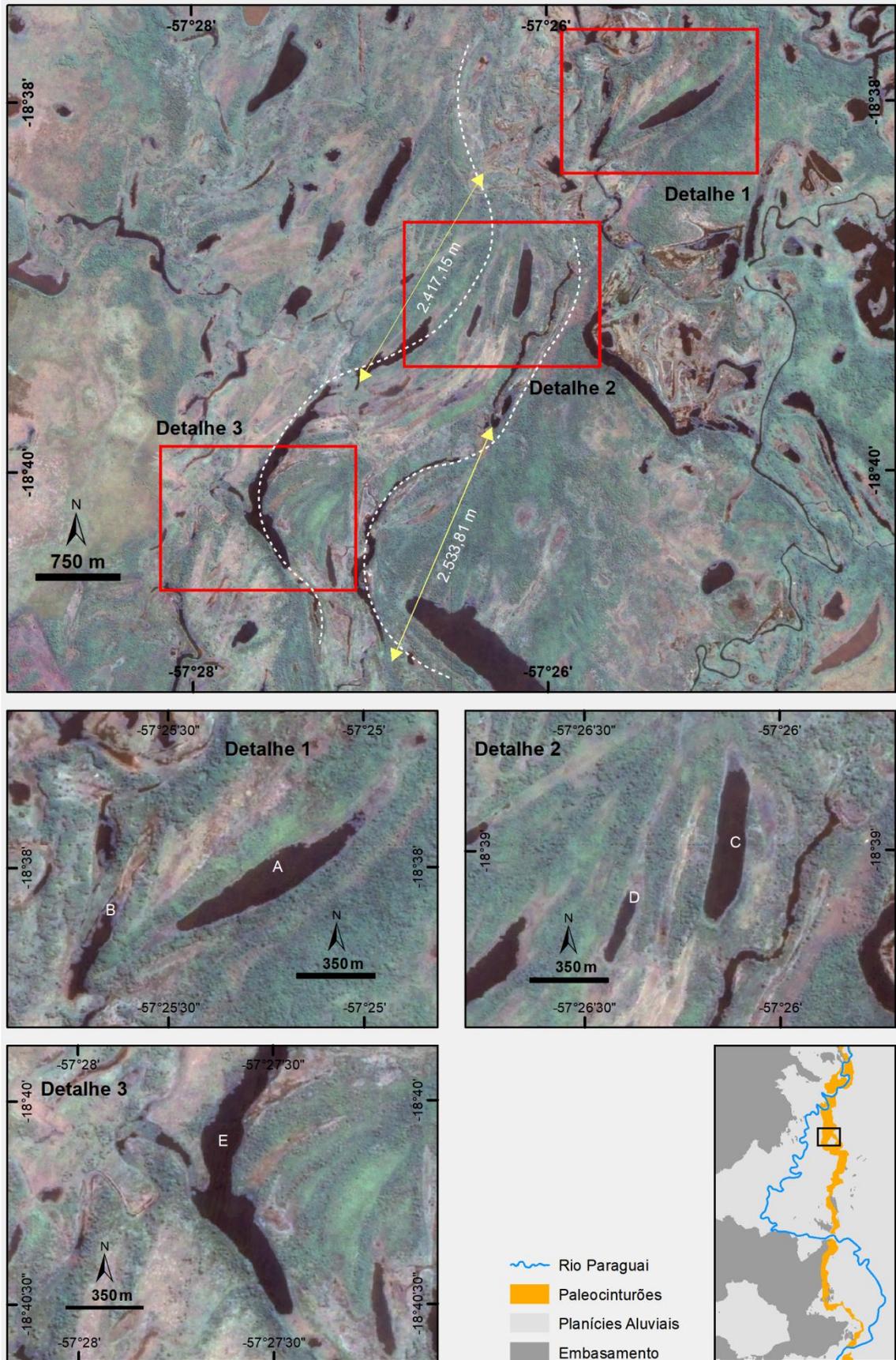
**Tabela 1** - Morfometrias do rio Paraguai usadas para estimativa de vazão média anual.

Seção (cap. 7)	Largura ( $x_1$ )	Corda ( $x_2$ )	Vazão média ( $y$ )
34	228	927	1.558,333
33	257	1.143	1.569,693
32	269	1.710	1.521,100
29	318	2.317	1.471,820
28	291	1.958	1.502,450
27	262	2.257	1.443,918
25	208	2.353	1.395,663

Fonte: Elaborado pelo autor. As medidas de largura são uma média do trecho do arco de meandro. A vazão média é a média entre as medidas feitas na cheia e na seca (ver capítulo 7).

Marcas de paleocanais no paleocinturão de meandros apresentam largura 1,54 vezes menor que a do rio Paraguai atual no seu trecho superior na área estudada (Figura 14), possuindo largura média de 170 metros. Utilizando-se a equação 1, vazão média anual dos paleocanais foi estimada, com base nas medidas de largura e nas medidas de corda de arco de meandro dos paleocanais presentes no paleocinturão de meandros (Figura 14), com valor de  $1.354,11 \text{ m}^3/\text{s}$ . O valor de vazão estimada para os paleocanais é 0,9 vezes o valor de vazão média do rio Paraguai no trecho superior na área estudada, o que indica que as vazões do paleocanais eram muito próximas às do rio Paraguai atual.

Figura 14 - Paleocanais do paleocinturão de meandros.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Landsat TM5 R3G2B1 fundida à imagem CBERS-HRC.

O rio Paraguai-Mirim tem parte de seu fluxo dentro do paleocinturão de meandros. Esse rio nasce na margem esquerda do rio Paraguai, na latitude da lagoa Vermelha, tendo largura de aproximadamente 75 metros e vazão média de ~138 m<sup>3</sup>/s, recebendo águas de canais provenientes do leque do Taquari e do próprio rio Taquari, em seu percurso no sentido norte-sul. Em sua foz no rio Paraguai, aproximadamente 25 km a jusante da cidade de Corumbá, o rio Paraguai-Mirim tem largura de 95 metros e vazão média de ~238 m<sup>3</sup>/s (ver capítulo 7).

O paleocinturão de meandros é cortado pelo cinturão de meandros atual do rio Paraguai, na altura da foz do rio Paraguai-Mirim. Na margem direita do rio Paraguai, esse compartimento geomorfológico tem sua drenagem comandada pelo rio Corixo Fundo (Figura 18). O paleocinturão de meandros tem seu final na altura do distrito de Albuquerque, no paleocanal dos Periquitos, próximo a confluência do rio Miranda, onde é novamente truncado pelo cinturão atual do rio Paraguai (Figura 19).

Durante períodos de cheia, o paleocinturão de meandros fica inundado e parte da água de inundação fica retida nesse compartimento geomorfológico, a qual devolve a água ao rio Paraguai na foz do rio Paraguai-Mirim.

### 5.2.3. Cinturão de meandros

Um cinturão de meandros foi identificado no MDE (Figura 10) e na imagem ótica (Figura 9). Esse cinturão é composto por diversos elementos morfológicos, dentre os quais: o canal do rio Paraguai, lagoas (*oxbow lakes*, lagoas de espiras de meandros, lagoas de diques), espiras de meandro (*scroll bars*), diques marginais e ilhas.

No cinturão atual, diversos meandros abandonados são reconhecidos. Meandros são abandonados pelo fenômeno de corte do canal (*cutoffs*). Existem dois tipos de corte de canal, que podem produzir meandros abandonados: o *neck cutoff* e o *chute cutoff*. O primeiro tipo de abandono de meandro ocorre quando um quase completamente recurvado meandro é cortado através de um “pescoço” (Figura 15). *Chute cutoff* é o produto da mudança do curso do canal durante um fluxo de cheia, no qual um novo talvegue se forma através da barra em pontal que o rio constrói na margem côncava (SMITH, 1996).

O cinturão atual do rio Paraguai foi subdividido em cinco trechos. A divisão em trechos foi realizada de acordo com a direção e largura do cinturão, e também

em relação à sinuosidade do canal (Tabela 2). A sinuosidade do rio Paraguai diminui para jusante e a planície fluvial é estreita e encaixada na entrada da Planície Fluvial Paraguai-Nabileque.

**Tabela 2** - Parâmetros morfométricos para cada trecho do cinturão de meandros atual do rio Paraguai.

Trecho	Sinuosidade	Largura média (km)	Declividade (cm/km)	Direção
1	1,62	1,18	3,99	SSW/NNE
2	1,78	1,82	2,94	SSW/NNE
3	1,29	1,29	2,88	ESE/WNO
4	1,38	1,49	2,44	SSE/NNO
5	1,19	1,61	2,56	SSW/NNE

Fonte: Elaborado pelo autor. A declividade foi medida com valores de desnível medido no MDE.

O rio corre no rumo SSW da lagoa Vermelha até a lagoa Cáceres, mas a largura do cinturão de meandros e a sinuosidade do canal aumentam na altura da baía do Castelo, configurando os dois primeiros trechos. O curso do rio deflete bruscamente para leste na confluência do canal do Tamengo, que liga o rio Paraguai à lagoa de Cáceres, configurando o terceiro trecho cuja direção, conforme [Assine e Soares \(2004\)](#), é controlada estruturalmente. Após a ilha de Santana, o rio muda seu curso para SE, com nova deflexão para SSW na altura do Porto da Manga, definindo os dois últimos trechos.

Os dois primeiros trechos do cinturão atual apresentam diques marginais mais marcantes que nos demais trechos. Os trechos 3 e 5 possuem diques marginais pouco perceptíveis na imagem ótica e MDE. O terceiro trecho encontra-se condicionado por falha na borda da bacia (Figura 16).

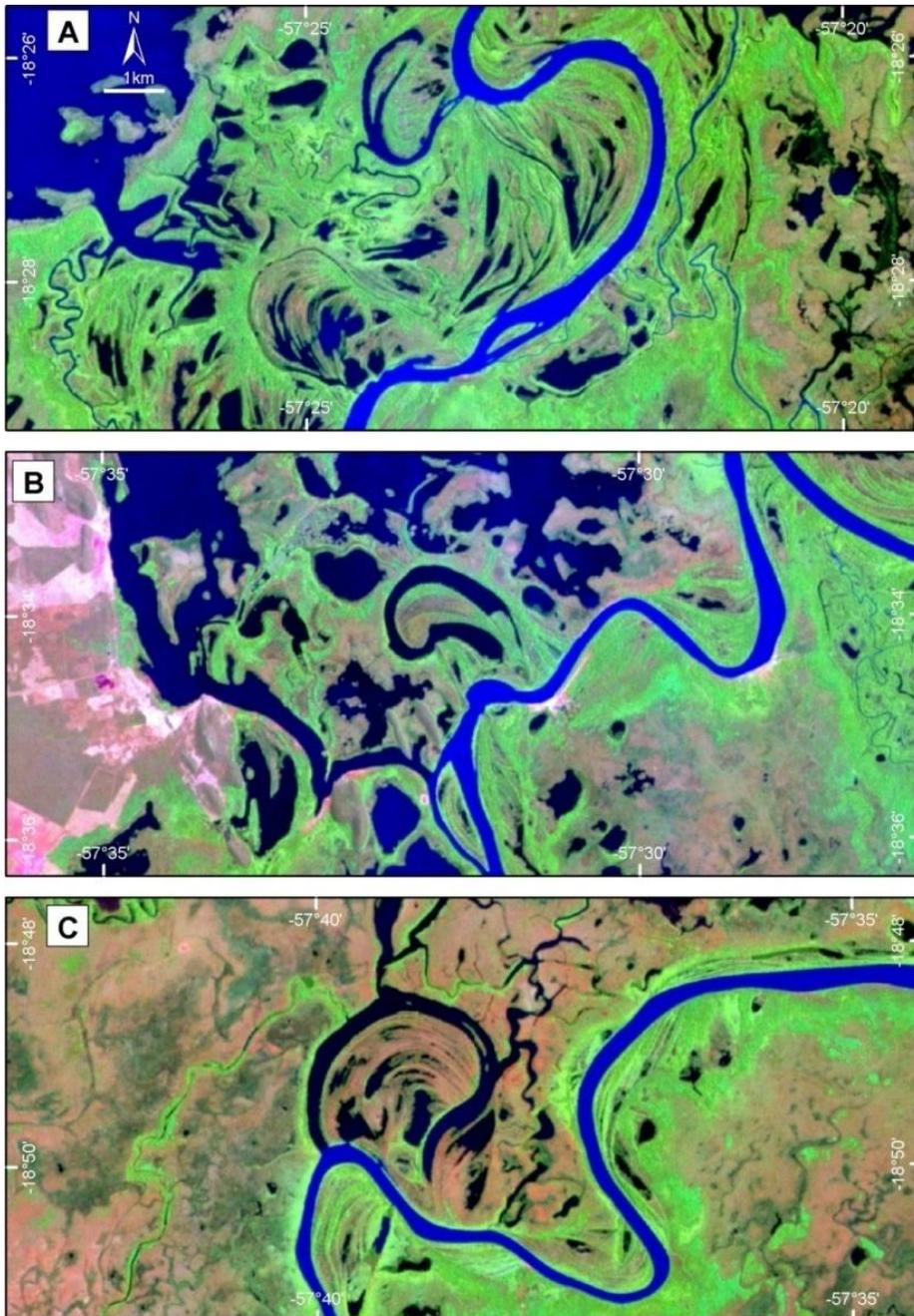
O trecho número quatro possui diques marginais bem desenvolvidos e pouca migração lateral do canal. O quinto trecho encontra-se encaixado, entalhando a planície adjacente e antigas formas do paleocinturão de meandros.

O cinturão de meandros atual trunca formas do paleocinturão de meandros em seu primeiro trecho, na parte norte da área estudada (Figura 17); no terceiro trecho, na confluência com o rio Paraguai-Mirim (Figura 18); e no quinto trecho após confluência com rio Miranda (Figura 19).

No trecho próximo a confluência com o Paraguai-Mirim é possível reconhecer que o cinturão atual trunca canais de geração anterior ao dele, com sinuosidade

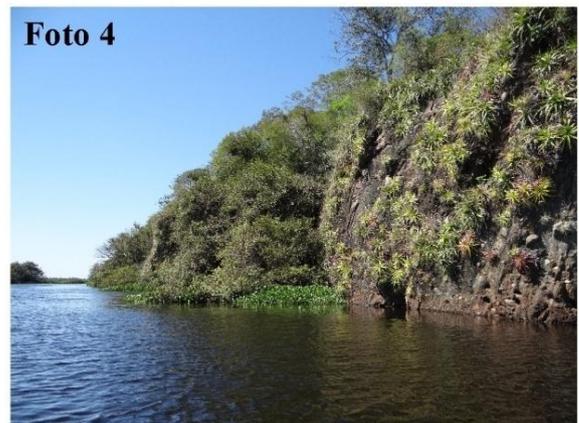
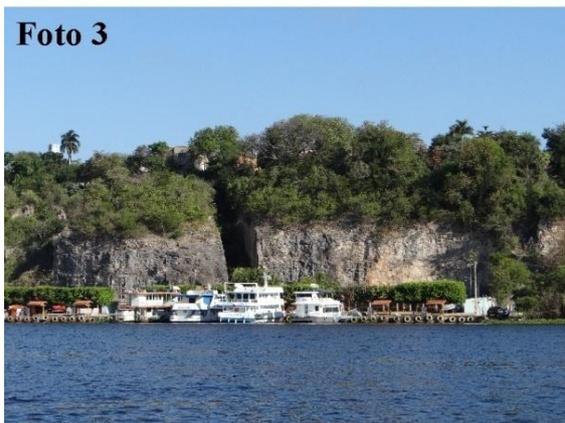
maior que a do rio Paraguai atual (Figura 18). A mesma diferença de sinuosidade é percebida em meandros abandonados por processo de *neck cutoff* (Figura 15).

**Figura 15** - Cortes de meandro reconhecidos no cinturão de meandros do rio Paraguai.



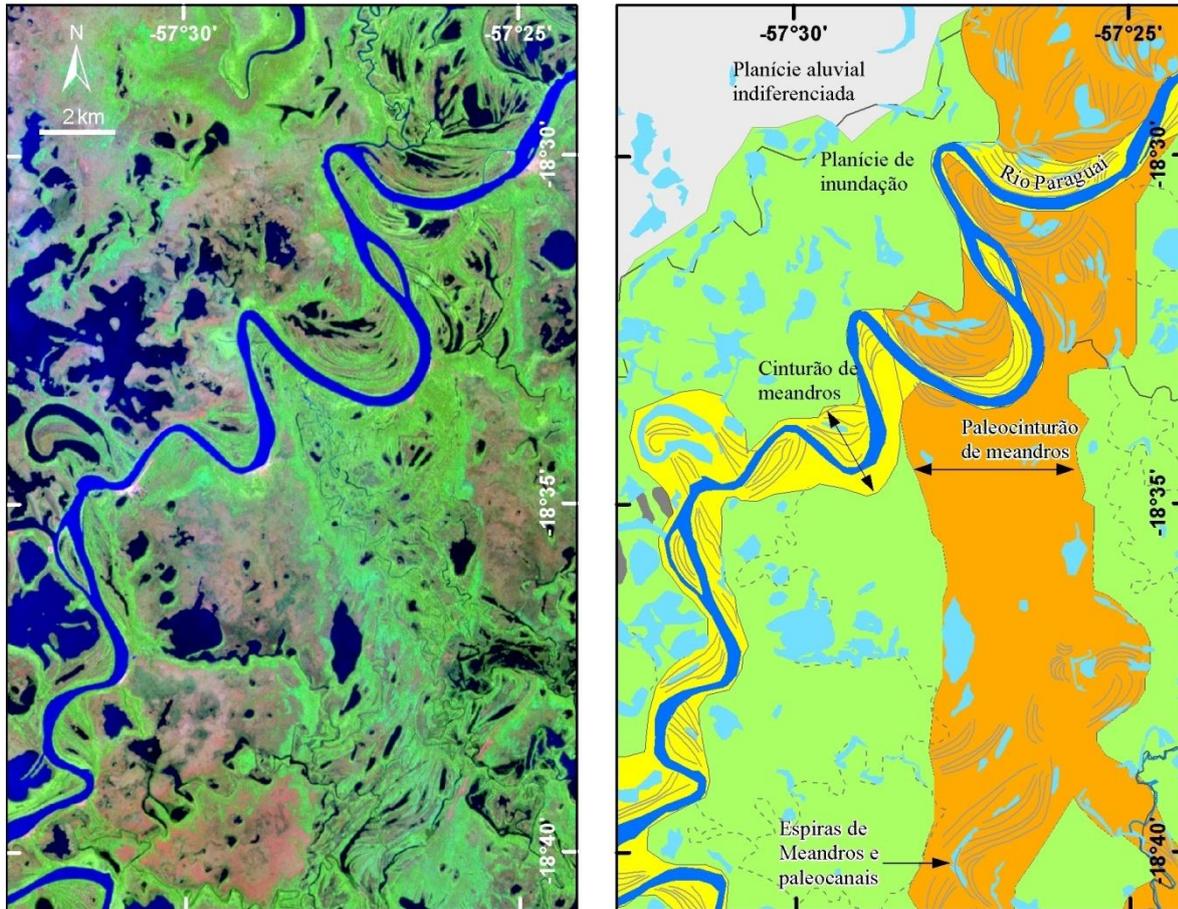
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 16** - Trecho do cinturão de meandros que está condicionado por falha leste-oeste na margem da bacia.



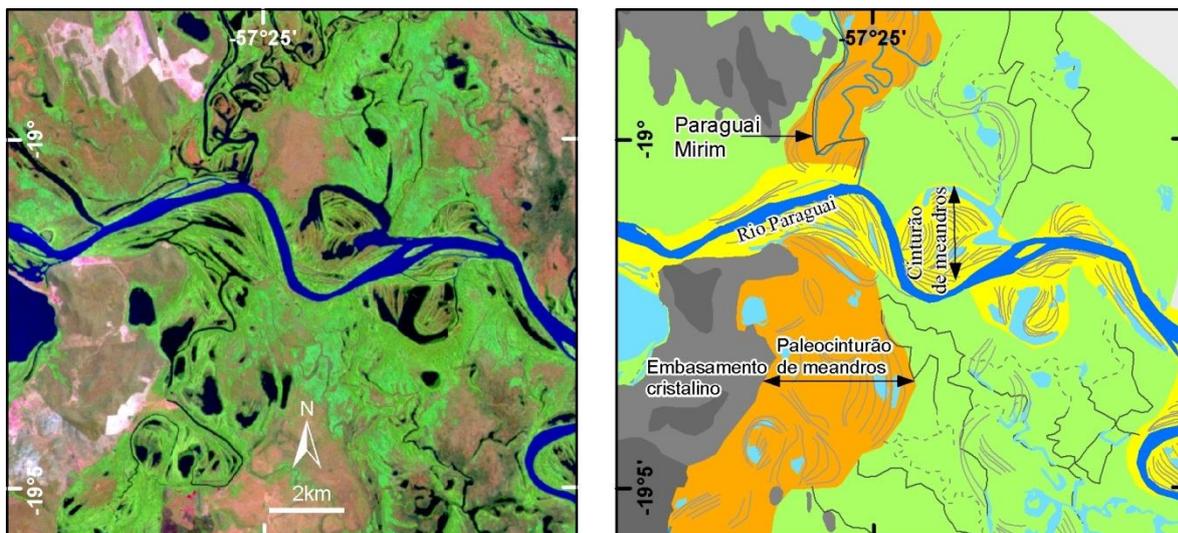
Fonte: Fotos do autor (05/08/2014) . Imagem Landsat 7 ETM+ R6G3B5.

**Figura 17** - Cinturão de meandros abandonado truncado pelo cinturão ativo do rio Paraguai (trecho 1).



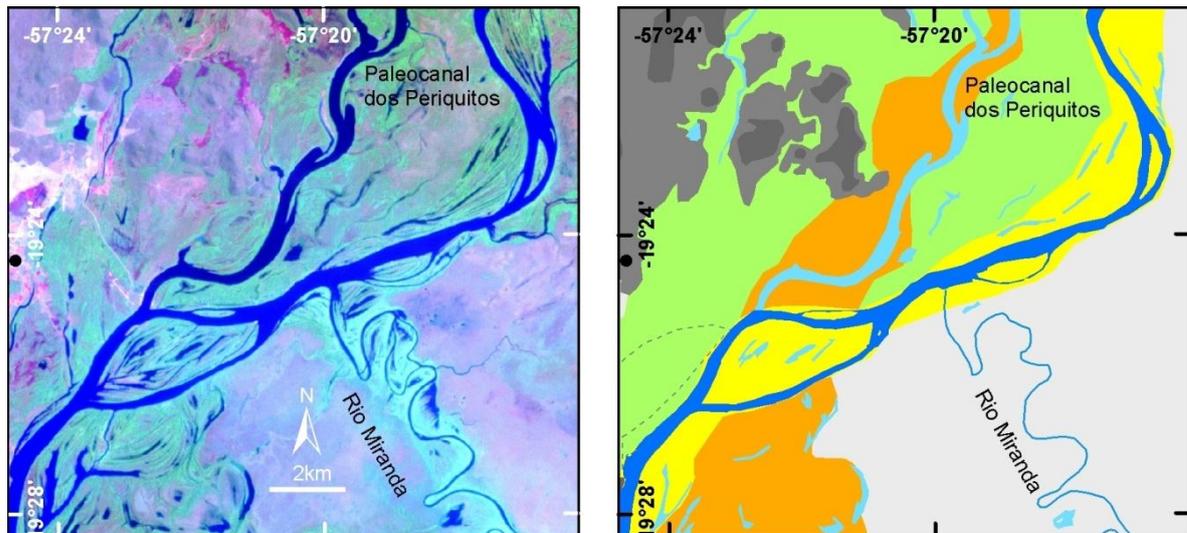
Fonte: Elaborado pelo autor. A) Imagem Ladsat 7 ETM+ (R6G3B5); B) Mapeamento realizado (legenda encontra-se na Figura 11).

**Figura 18** - Cinturão de meandros atual em seu terceiro trecho, cortando o paleocinturão de meandros.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) Imagem Landsat 7 ETM+ (R6G3B5); B) Interpretação realizada, mostrando a diferença de sinuosidade entre o rio Paraguai atual (1,3) e os paleocanais reconhecidos no cinturão atual (1,9). A legenda encontra-se na Figura 11.

**Figura 19** - Cinturão de meandros atual, no trecho cinco, truncando o paleocinturão de meandros.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) Imagem Landsat 7 ETM+ (R6G3B5); B) Interpretação feita. A legenda encontra-se na Figura 11.

### 5.3. Discussão dos Resultados

A PFPC apresenta evidências de mudanças paleoambientais sendo marcada pela existência de rede de paleocanais (canal-elevado) e paleocinturão de meandros. Das evidências preservadas na PFPC, a que mais se destaca é o paleocinturão de meandros com direção norte-sul bem demarcado nas imagens óticas e no Modelo Digital de Elevação (Figura 9 e Figura 10).

Embora atualmente o rio Paraguai flua confinado em um vale estreito, o sistema como um todo é afetado pelas cheias, quando ocorre o transbordamento das águas do canal fazendo com que fluxo em lençol inunde quase toda a área, erodindo, retrabalhando e depositando sedimentos, o que contribui para mascarar muitas das paleoformas. Isto é o que ocorre com alguns dos canais-elevados que têm parte obliterada, dificultando assim seu mapeamento.

A largura de alguns dos paleocanais encontrados no paleocinturão de meandros é menor que a do rio Paraguai (Figura 14), tornando consistente a interpretação de que o rio que formou esse cinturão possuía menor vazão que o rio Paraguai. Entretanto, estimativas de vazão realizadas por meio de medidas da largura de paleocanais e comprimento de corda de arco dos meandros (Eq.1), no paleocinturão, revelam que esse compartimento geomorfológico foi construído por canais com vazão muito próxima a do rio Paraguai atual. Diante disso, entende-se

que o paleocinturão de meandros seria de um período apenas um pouco mais seco que o atual, um período em que as condições climáticas eram parecidas com as atuais. Isto pode ser indicativo de que o paleocinturão foi construído na transição do Pleistoceno para o Holoceno, período de transição de um ambiente semiárido para semiúmido (estádio glacial para inter-glacial).

As paleoformas canal-elevado, existentes na bacia de inundação, apresentam dimensões bem menores que as do rio Paraguai atual e dos paleocanais reconhecidos no paleocinturão de meandros, indicando que a rede de drenagem em canal-elevado foi formada em período de menor vazão, anterior a construção do paleocinturão de meandros.

Portanto, a PFPC apresenta marcas que indicam um período mais seco em que o rio Paraguai fluía em canais-elevados. Com o aumento da umidade o rio muda seu padrão fluindo meandrantemente e construindo um cinturão de meandros de modo agradacional e truncando formas anteriormente produzidas (formas canal-elevado). O paleocinturão de meandros reconhecido na bacia de inundação do rio Paraguai teria sido produzido pelo antigo rio Paraguai, que fluía em condições hidrológicas próximas das atuais, visto que seus canais apresentavam menor dimensão, mas quase a mesma vazão que a do rio Paraguai atual (Figura 14 – Eq.1).

Dessa forma, o cinturão de meandros atual do rio Paraguai é produto de avulsão ocorrida na altura da baía do Castelo, provavelmente causada pelo aumento da vazão, precedido de maior aporte sedimentar que causou a agradação do antigo vale fluvial do rio Paraguai (paleocinturão). Avulsão fluvial também é uma explicação aventada por [Kuerten \(2010\)](#) para a mudança do curso do rio Paraguai no Pantanal do Nabileque. O processo de avulsão fluvial é amplamente reconhecido no Pantanal, principalmente nos rios dos leques fluviais. Esse processo, caracterizado por [Assine \(2003\)](#) e [Assine et al \(2005\)](#), consiste de sucessões de processos deposicionais no canal, seguido de rompimento do dique-marginal (*crevasse*), até culminar no abandono do antigo leito.

A mudança do curso do rio Paraguai pode ter sido causada por aumento na vazão devido às mudanças climáticas regionais. Estas podem ter acelerado os efeitos sobre a produção de sedimentos na bacia, causando assim maior aporte

sedimentar, que acarretou na agradação dos canais e contribuiu para o processo de avulsão.

Condições de aridez durante o Quaternário são referidas na literatura, com transição de condições de clima semiárido para semiúmido na passagem do Pleistoceno para o Holoceno, provocando mudanças nos sistemas deposicionais (MAY et al., 2008; WHITNEY et al., 2011; McGLUE et al., 2012; LATRUBESSE et al., 2012). Nessas condições, maior produção de sedimentos seria favorecida devido a pouca cobertura vegetal deixada pelo clima mais seco. Com a continuação de um clima mais úmido, a produção de sedimentos cairia por conta do aumento da cobertura vegetal e incisões tomariam lugar no sistema fluvial.

Diversos trabalhos apontam as mudanças climáticas como o principal fator da alteração das características fluviais (KNIGHTON, 1998; CARAGNANO, 1999; SOHN et al, 2007; MIALI, 1996; ASSINE; SILVA, 2009). Smith (1996), estudando o baixo vale aluvial do rio Mississipi, reconheceu mudanças no regime desse rio, na passagem do Pleistoceno para o Holoceno. Nesse trabalho, o autor reconhece mudança de um regime de canais entrelaçados (*braided*), influenciado pela glaciação no estágio Wisconsin, para um regime meandrante sinuoso no final do Pleistoceno. Nesse processo, o rio Mississipi muda de padrão entrelaçado para padrão meandrante, produzindo a planície aluvial atual, com feições semelhantes às reconhecidas na planície fluvial do rio Paraguai na área aqui estudada.

Mudanças climáticas quaternárias são amplamente aceitas para explicar alterações em sistemas fluviais. Shukla et al. (2001), por exemplo, lança mão dessa hipótese para explicar incisão fluvial ocorrida no rio Ganga. Incisão fluvial é reconhecida no cinturão de meandros na PFPC, o qual entalha o paleocinturão e a bacia de inundação (Figura 17 a Figura 19). Essa incisão seria indicativa de que o cinturão atual foi formado no Holoceno, hipótese esta corroborada por datações feitas por Kuerten (2010), que indicam idades em torno de 6,5 - 2,1 Ka AP para o cinturão de meandros atual do rio Paraguai, no Pantanal do Nabileque. Kuerten (2010) obteve idades correlatas para o cinturão de meandros onde corre o rio Nabileque e o cinturão de meandros do rio Paraguai, indicando que o rio Paraguai esteve bifurcado. O mesmo pode ter ocorrido no rio Paraguai, da lagoa Vermelha à confluência do rio Miranda, onde o cinturão de meandros antigo foi sendo abandonado à medida que o rio Paraguai construía o seu atual cinturão de

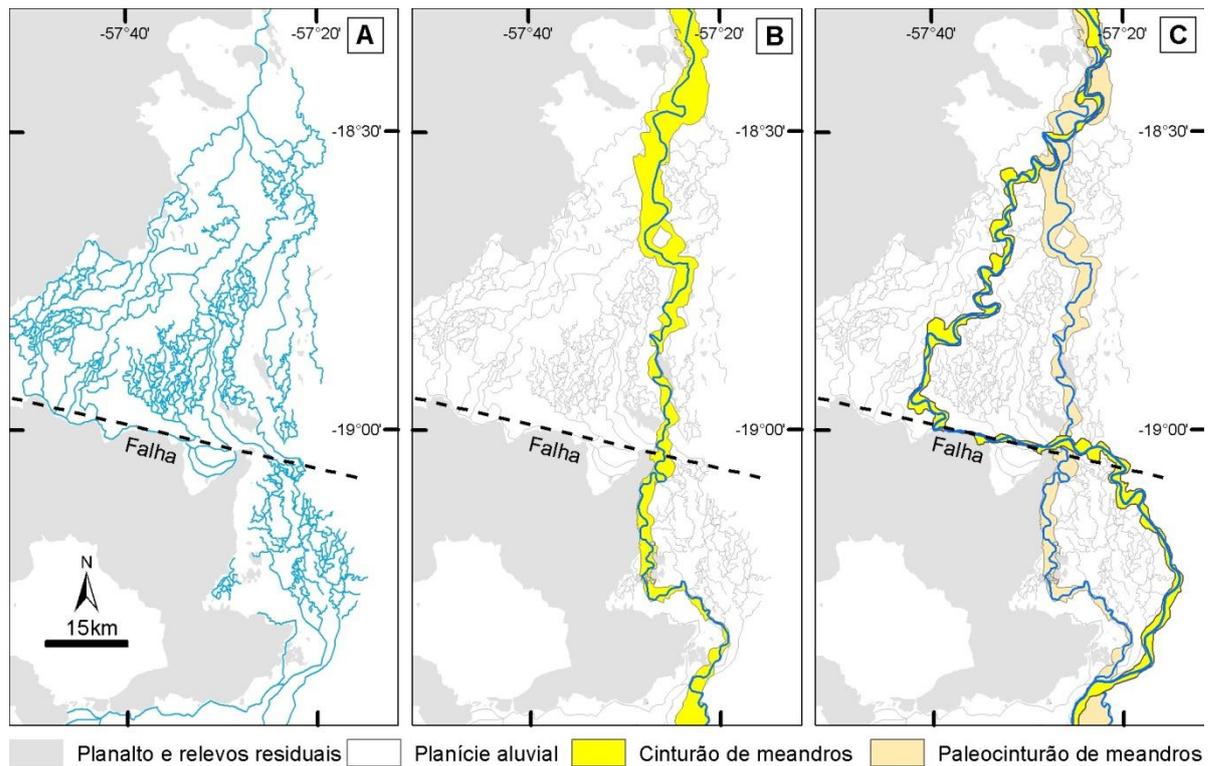
meandros. Os paleocanais do paleocinturão de meandros apresentam largura maior que a do rio Paraguai-Mirim, indicando que o rio Paraguai-Mirim não foi o agente construtor do cinturão de meandros onde corre, caracterizando-se como um canal subajustado (*underfit*).

Com base nos dados e nas interpretações feitas, um modelo evolutivo da planície Paraguai-Corumbá foi esboçado no intuito de se avançar na compreensão da evolução geomorfológica da PFPC (Figura 20). O primeiro evento reconhecido foi a formação de uma rede de canais em forma canal-elevado, fluindo em ampla planície aluvial (Figura 20A). Esse sistema parece ter sido produzido num período de menor vazão (Pleistoceno), visto que seus canais apresentam dimensões inferiores aos canais do paleocinturão de meandros.

A mudança do estilo fluvial com formas canal-elevado para a construção de cinturões de meandros foi interpretada como o resultado do aumento da descarga líquida e do aporte sedimentar, devido a mudanças climáticas regionais (Figura 20B). A julgar pela menor largura dos canais em relação ao rio Paraguai atual e ao comprimento das cordas de arco de meandro, o paleocinturão de meandros deve ter sido construído por sistema fluvial com descarga semelhante à atual. Essa morfologia também deve possuir maior tempo de formação, visto que sua largura é bem maior que a do cinturão atual.

Com base nas características morfométricas dos canais do paleocinturão, estes teriam se formado em planície não-confinada, sob regime de aumento na precipitação e na descarga fluvial. Aumento da umidade no intervalo de tempo situado do final do Pleistoceno ao Holoceno inferior e consequente aumento da descarga fluvial do rio Paraguai são corroborados por estudos realizados na lagoa Gaíva, situada a norte da área e geneticamente ligada à PFPC ([WHITNEY et al., 2011](#); [MCGLUE et al., 2012](#)).

**Figura 20** - Esquema evolutivo da PFPC.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) diversos canais em forma canal-elevado se espalham pela planície aluvial formando uma rede de drenagem; B) com mudança na vazão o rio passa a formar cinturão de meandros com sentido norte-sul, truncando as formas canais-elevados; C) evento de avulsão causa mudança no curso do rio que se estabelece no rumo SSW, com progressivo abandono do cinturão de meandros antigo, onde o rio Paraguai-Mirim se instala. O rio Paraguai é condicionado em falha da borda da bacia nas proximidades da cidade de Corumbá e corta seu antigo cinturão nas proximidades das lagoas Negra e do Arroz, truncando-o novamente logo após a foz do rio Miranda.

Segundo estudo de [McGlue et al. \(2012\)](#), o registro sedimentar da lagoa Gaíva revelou período mais seco no início e gradativamente mais úmido durante o Holoceno médio, responsável por inundações frequentes no Paraguai e expansão do lago entre 6,2 e 5,3 ka. Associado ao mesmo evento de expansão das áreas inundáveis, ocorreu o estabelecimento de condições lacustres na baía do Castelo por volta de 6,5 ka ([BEZERRA; MOZETTO, 2008](#)). Essa condição pode ter acarretado a subida do nível de base regional e as planícies foram palco de agradação fluvial, colmatando os cinturões que agora têm altimetria muito semelhante à planície na qual estão encaixados. Outra possibilidade é que essa condição hidrológica mais úmida causou maior intensidade da atividade fluvial (aumento de vazão). Com descarga fluvial maior, o sistema de drenagem da área carrou mais sedimento para o cinturão de meandros, que aos poucos foi sendo preenchido, e isso pode ter iniciado processos de *crevasse* no antigo rio Paraguai.

Com maior aporte sedimentar, o antigo vale do rio Paraguai foi sendo preenchido e isso, associado ao aumento da vazão, contribuiu para a avulsão do rio, culminando na mudança do curso para a posição atual (direção SSW). A mudança do paleocinturão de meandros para o cinturão atual foi gradual à medida que a vazão foi aumentando e o aporte sedimentar foi diminuindo.

Com o progressivo aumento da umidade, o novo canal do rio Paraguai passou a entalhar seu antigo cinturão (Figura 20C) cortando também a rede de drenagem em canal-elevado construída anteriormente. A atual dinâmica hidrológica da planície fluvial do rio Paraguai mascara as paleoformas impressas na paisagem por meio da deposição e retrabalhamento de sedimentos na bacia de inundação.

As formas deposicionais da área são, portanto, o resultado da sobreposição de diferentes padrões fluviais, sendo isso, consequência de mudanças climáticas ocorridas, provavelmente, no final do Pleistoceno e no Holoceno médio.

#### **5.4. Conclusões**

A PFPC é uma área de sedimentação continental quaternária que abriga notável evidência de mudança ambiental. O paleocinturão de meandros reconhecido na área é um importante registro de mudança climática impressa na bacia de inundação do rio Paraguai. As formas identificadas nesse compartimento permitiram entender um pouco mais as alterações ambientais que vem passando o sistema fluvial que compõe o Pantanal.

A planície estuda é marcada por evidências de mudanças ambientais que podem auxiliar na compreensão da gênese e evolução do Pantanal. Essa planície é composta por compartimentos geomorfológicos formados por complexa associação de formas deposicionais, e é limitada por planícies adjacentes (construídas pelos afluentes do rio Paraguai) e pelo embasamento da bacia, que em alguns casos condiciona o comportamento do rio Paraguai.

As associações de formas reconhecidas na PFPC indicam mudanças paleoclimáticas que ocorreram na região, afetando assim o sistema fluvial da planície e provocando mudanças no estilo fluvial do rio Paraguai. O rio Paraguai mudou seu padrão fluvial de acordo com as condições hidrossedimentológicas reinantes. Os ajustes no clima da região foram influenciados por mudanças climáticas globais, associados, provavelmente, pelos estádios glaciais.

A passagem de um clima mais seco para outro mais úmido causou impactos na produção de sedimentos da bacia, influenciando, dessa forma, todo o Pantanal e conseqüentemente a PFPC. Avulsão ocorreu no momento de maior descarga fluvial precedido de maior aporte sedimentar no sistema, causando a mudança do curso do rio Paraguai na altura da baía do Castelo. Com aumento da descarga fluvial, por causa da melhora climática, o rio Paraguai passou a entalhar a planície, truncando seu antigo cinturão de meandros.

Com a continuidade da melhora climática, o rio Paraguai muda de posição devido à diminuição no aporte sedimentar do sistema, influenciado pelo aumento da cobertura vegetal causado pelo aumento da pluviosidade. As antigas formas impressas na planície foram gradativamente obliteradas pelo atual regime hidrológico, que passa a ser marcado por inundações periódicas, provocando retrabalhamento dos sedimentos depositados, mascarando inúmeras feições.

Portanto, toda a área estudada abriga um mosaico geomorfológico com diversos tipos de feições morfológicas geradas no Quaternário, resultado de mudanças climáticas ocorridas desde o Pleistoceno Tardio. Destaca-se o registro da mudança do curso do rio Paraguai, decorrente de fenômeno de avulsão fluvial. Em decorrência da mudança do curso e abandono do antigo cinturão, o rio Paraguai-Mirim instalou-se no paleocinturão de meandros, com dimensões muito inferiores às paleoformas encontradas na sua planície, o que permite classificá-lo como um rio subajustado (*underfit stream*).



## **6. GEOCRONOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DOS COMPARTIMENTOS MAPEADOS**

Na história do planeta, inúmeras mudanças ambientais deixaram um grande número de registros geológicos impressos na paisagem. A compreensão dos fatores responsáveis pelas mudanças ambientais recentes constitui importante ferramenta para a interpretação da evolução do relevo, além de possuir grande potencial para previsão e planejamento das atividades humanas frente às prováveis mudanças ambientais futuras.

O Pantanal é um excelente laboratório natural para estudos tanto geológicos como geomorfológicos, sendo um exemplo de paisagem mutante, resultado da existência de uma drenagem que migra frequentemente ([ASSINE, 2009](#)). Esse imenso trato deposicional abriga registros geomorfológicos que testemunham mudanças ambientais que vêm ocorrendo desde o Pleistoceno ([ALMEIDA, 1945](#); [TRICART, 1982](#); [AB'SABER, 1988](#); [ASSINE et al., 1997](#); [SOARES et al., 2003](#); [ASSINE; SOARES, 2004](#)). Nesse ponto, o Pantanal é uma excelente área para se compreender as mudanças climáticas que, em muitas das vezes, foram responsáveis por processos de abandono de canais e mudanças no regime de fluxo.

Desse modo, este capítulo tem os objetivos de: 1) Caracterizar a sedimentologia dos compartimentos identificados no capítulo anterior; 2) Reconhecer mudanças paleo-hidrológicas que ocorreram na área; 3) Propor modelo evolutivo do sistema deposicional da PFPC durante o Quaternário, com base em datações absolutas.

### **6.1. Materiais e Métodos**

Imagens Landsat 7 ETM+, CBERS/HRC e RapidEye foram utilizadas no reconhecimento das formas de terreno presentes na PFPC. A partir das imagens e do mapeamento realizado no capítulo anterior, locais foram escolhidos para realização de sondagem rasa com vibrotestemunhador e, em alguns casos, com percussão com marreta, após abertura inicial do furo com trado manual. As sondagens foram realizadas em locais que representassem bem a geoforma mapeada e que possuísse acesso. Para a recuperação dos testemunhos dos depósitos sedimentares, tubos de alumínio de 3 metros de comprimento e com 3" (76 mm) de diâmetro foram utilizados.

De acordo com o tipo de material sondado nos locais preestabelecidos (Figura 21), quinze amostras foram retiradas dos testemunhos recuperados e enviadas para datação pelo método de Luminescência Opticamente Estimada (LOE/SAR) (MURRAY; WINTLE, 2000; WINTLE; MURRAY, 2006) no Laboratório de Espectrometria Gama e Luminescência (LEGaL), do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de São Paulo (USP). Essa técnica tem sido utilizada no Pantanal por diversos autores com resultados bastante satisfatórios. A ausência de material apropriado impediu o uso de datação por  $^{14}\text{C}$ .

A preparação das amostras seguiu os procedimentos definidos por Sawakuchi et al. (2008). As análises LOE/SAR foram realizadas em um sistema automático Risø (Risø National Laboratory). Para cada amostra, a dose equivalente final foi determinada por uma média ponderada das alíquotas mensuradas.

Os testemunhos foram fotografados e descritos sob ambiente de luz artificial branca. Os resultados foram inseridos em perfis sedimentológicos (Figura 22 a Figura 25). A classificação granulométrica dos testemunhos foi obtida por análise visual-tátil das amostras.

## 6.2. Resultados

Onze testemunhos foram recuperados na PFPC, sendo quatro no paleocinturão de meandros, quatro no cinturão de meandros atual e três na bacia de inundação. Desses testemunhos, apenas dez foram amostrados para datação por LOE (Figura 21 a Figura 25; Tabela 3 a Tabela 6).

**Tabela 3** - Localização dos testemunhos recuperados na campanha de sondagem.

Ponto	Latitude	Longitude	Compartimento	Profundidade final
P-1	18°31'36,78" S	57°26'51,13" O	Cinturão de meandros	1,38 m
P-2	18°31'38,30" S	57°27'05,53" O	Cinturão de meandros	1,48 m
P-4	18°32'05,65" S	57°26'58,74" O	Paleocinturão de meandros	1,70 m
P-5	18°34'21,03" S	57°30'25,47" O	Cinturão de meandros	1,37 m
P-6	18°35'03,83" S	57°30'54,77" O	Bacia de inundação	1,00 m
P-7	18°56'04,12" S	57°25'21,45" O	Paleocinturão de meandros	1,38 m
P-8	19°15'35,52" S	57°19'53,81" O	Bacia de inundação	1,31 m
P-11	19°15'31,89" S	57°18'32,68" O	Bacia de inundação	1,36 m
P-14	18°56'41,50" S	57°41'38,50" O	Cinturão de meandros	4,00 m

**Tabela 3** - Continuação

Ponto	Latitude	Longitude	Compartimento	Profundidade final
P-15	18°56'30,20" S	57°25'31,70" O	Paleocinturão de meandros	3,00 m
P-16	18°56'04,80" S	57°25'21,40" O	Paleocinturão de meandros	3,50 m

Fonte: Elaborado pelo autor. Coordenadas referenciadas ao datum WGS-84.

As amostras analisadas apresentaram bons resultados quanto ao protocolo SAR. As taxas de dose do meio foram estimadas por espectrometria gama e estão discriminadas na Tabela 4. As taxas de dose variaram de 0,300 a 1,469 Gy/ka. As doses equivalentes foram determinadas pelo protocolo SAR em alíquotas multigrãos de quartzo e estão discriminadas na Tabela 5. As doses equivalentes variaram de 0,246 a 25,6 Gy. As estatísticas mostram que as amostras são boas para estimativa de dose equivalente, pois apresentaram bons resultados para os testes de razão de reciclagem (*recycling ration test*), teste de recuperação (*recuperation test*) e dispersão global (*over-dispersion*). O *recycling ration* variou de 0,95 a 1,01. O teste de recuperação variou de -2,12 a 1,50 %, e o *Over-Dispersion* variou de 3,1 a 39 %. Todos esses parâmetros mostram que as amostras estão dentro do critério de rejeição ( $RR$  e  $R_c \leq 5$  %).

**Tabela 4** - Taxas de dose das amostras realizadas.

Furo	Prof. (m)	Taxa de dose Gamma (Gy/ka)	Taxa de dose beta (Gy/ka)	Taxa de dose cósmica (Gy/ka)	Taxa de dose total (Gy/ka)
P-1	0,36	0,431	0,526	0,1895	1,146
	1,31	0,364	0,476	0,1671	1,008
P-2	1,37	0,436	0,550	0,1658	1,152
	1,44	0,132	0,207	0,1643	0,503
P-8	0,14	0,652	0,621	0,1951	1,469
	1,26	0,475	0,519	0,1680	1,162
P-11	1,33	0,412	0,445	0,1665	1,024
P-7	1,35	0,844	0,897	0,1662	1,907
P-5	1,33	0,506	0,670	0,1668	1,344
P-4	0,42	0,445	0,533	0,1879	1,165
	1,00	0,403	0,496	0,1740	1,072
	1,56	0,529	0,643	0,1618	1,334

**Tabela 4** - Continuação

Furo	Prof. (m)	Taxa de dose Gamma (Gy/ka)	Taxa de dose beta (Gy/ka)	Taxa de dose cósmica (Gy/ka)	Taxa de dose total (Gy/ka)
P-14	3,93	0,146	0,217	0,1200	0,483
P-15	2,93	0,068	0,096	0,1360	0,300
P-16	3,45	0,095	0,156	0,1274	0,379

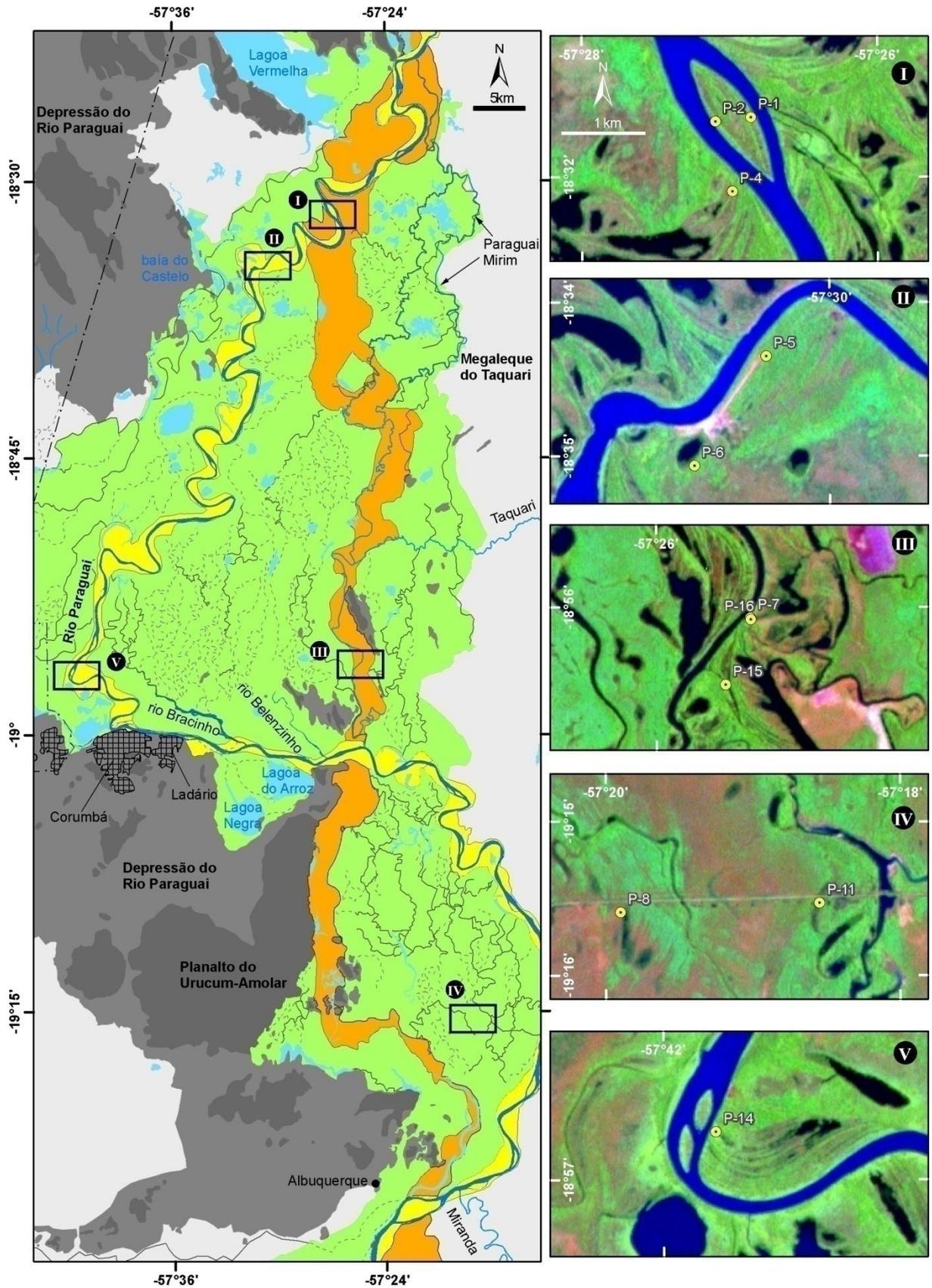
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 5** - Doses equivalentes e estatística das amostras realizadas.

Furo	Prof. (m)	N <sup>1</sup>	D <sub>e</sub> (Gy) <sup>2</sup>	O.D. (%) <sup>3</sup>	RR <sup>4</sup>	Rc (%) <sup>5</sup>
P-1	0,36	18	0,4±0	32,7	0,98±0,01	1,50±0,28
	1,31	19	0,9±0,1	39,0	1,00±0,01	-0,38±0,19
P-2	1,37	19	0,6±0	26,5	1,00±0,02	-0,25±0,43
	1,44	12	0,3±0	19,9	0,98±0,03	-2,12±0,94
P-8	0,14	24	4,2±0,2	26,2	1,01±0,01	-0,04±0,02
	1,26	22	25,6±0,4	7,0	1,00±0,01	0,05±0,01
P-11	1,33	14	17,5±0,2	3,1	1,00±0,01	0,02±0,01
P-7	1,35	20	7,7±0,1	3,3	0,99±0,01	0,04±0,03
P-5	1,33	24	1,9±0,1	30,2	1,00±0,01	0,02±0,04
P-4	0,42	19	1,8±0,1	17,2	1,00±0,01	0,06±0,08
	1,00	20	2,1±0,1	16,7	0,99±0,01	-0,03±0,06
	1,56	24	2,1±0,1	22,7	0,99±0,01	0,15±0,01
P-14	3,93	23	0,642±0,012	8,1	0,96±0,01	0,69±0,02
P-15	2,93	19	0,246±0,008	13,2	0,95±0,01	1,07±0,09
P-16	3,45	22	3,75±0,06	7,9	0,99±0,01	0,15±0,01

Fonte: Elaborado pelo autor. 1 – Número de alíquotas; 2 – Dose equivalente pelo Central Age Model (Galbraith et al., 1999); 3 – Over Dispersion; 4 – valores médios de recycling ration; 5 – valores médios de recuperação.

Figura 21 - Mapa de localização dos testemunhos recuperados.



Fonte: Elaborado pelo autor. Compartimentação geomorfológica à esquerda, com imagem ETM+ nos detalhes.

### 6.2.1. Sedimentologia

A profundidade máxima atingida pelos testemunhos realizados apenas com vibrotestemunhador e percussão à marreta foi de 1,70 m, com mínima de 1,00 m (Figura 22 a Figura 24). Os testemunhos coletados com uso de trado manual e posterior coleta de tubo atingiram profundidade máxima de 4,00 m (Figura 25). O empilhamento vertical dos testemunhos apresenta granulodecrescência ascendente (com exceção do furo P-7) e presença constante de bioturbação atingindo ao mosqueamento (raízes e marcas de raízes). O material em todos os testemunhos apresenta coloração amarelo avermelhada ou marrom, indicativa de precipitação de óxido de ferro. Os sedimentos de modo geral apresentam granulação bastante fina, com predominância de areia fina a muito fina, além de silte.

Em todos os testemunhos foram reconhecidos apenas fácies deposicionais (modificadas de Miall, 1978) de fluxo de baixa energia (Sm), alternância de processo de tração e decantação (S/F), ou fácies de processos de decantação e pedogênese (Fm). Os depósitos do cinturão de meandros constituem-se, predominantemente, de areia maciça de granulação fina a muito fina, de cor clara, com ou sem fragmentos vegetais (Sm; Sm(o)). O mesmo foi encontrado para o paleocinturão de meandros que apresentou maior variação de fácies apenas no testemunho P-4 (Fm; Sm; S/F).

Os perfis obtidos no cinturão de meandros (Figura 24) mostram predominância de fácies de areia fina a muito fina com estrutura maciça, de coloração cinza (Sm). A presença de bioturbação por raízes é constante, juntamente com o mosqueamento marrom e vermelho. A profundidade máxima alcançada com uso de vibrotestemunhador e marreta foi de 1,48 m e mínima de 1,37 m. A profundidade alcançada com uso de trado foi de 4,00 m (Figura 25). Um contato erosivo foi identificado no furo P-5 a uma profundidade de 33 cm. Essa discordância, provavelmente, mostra o momento em que o canal deixou de depositar a barra em pontal (*point bar*) e esta foi transformada em espira de meandros (*scroll bar*). As fácies dos furos P-1 e P-2 são relativas a depósitos de barra que se formou no centro canal (*mid channel bar*) e que hoje se estabeleceu como uma ilha. As fácies identificadas no furo P-2 mostram depósitos de canal (areia muito fina branca) na porção basal do testemunho (1,34 – 1,48 m de profundidade). Esses depósitos são recobertos por depósitos mais finos (areia siltosa) que indicam mudança para um ambiente com alternância de processos de tração e decantação, representativo do

momento em que a barra passou a ficar emersa em determinados momentos. Acima desses depósitos, tem-se face (silte cinza-claro referente a pedogênese e atividade vegetal) que indica momento em que a ilha pode ter começado a se estabelecer.

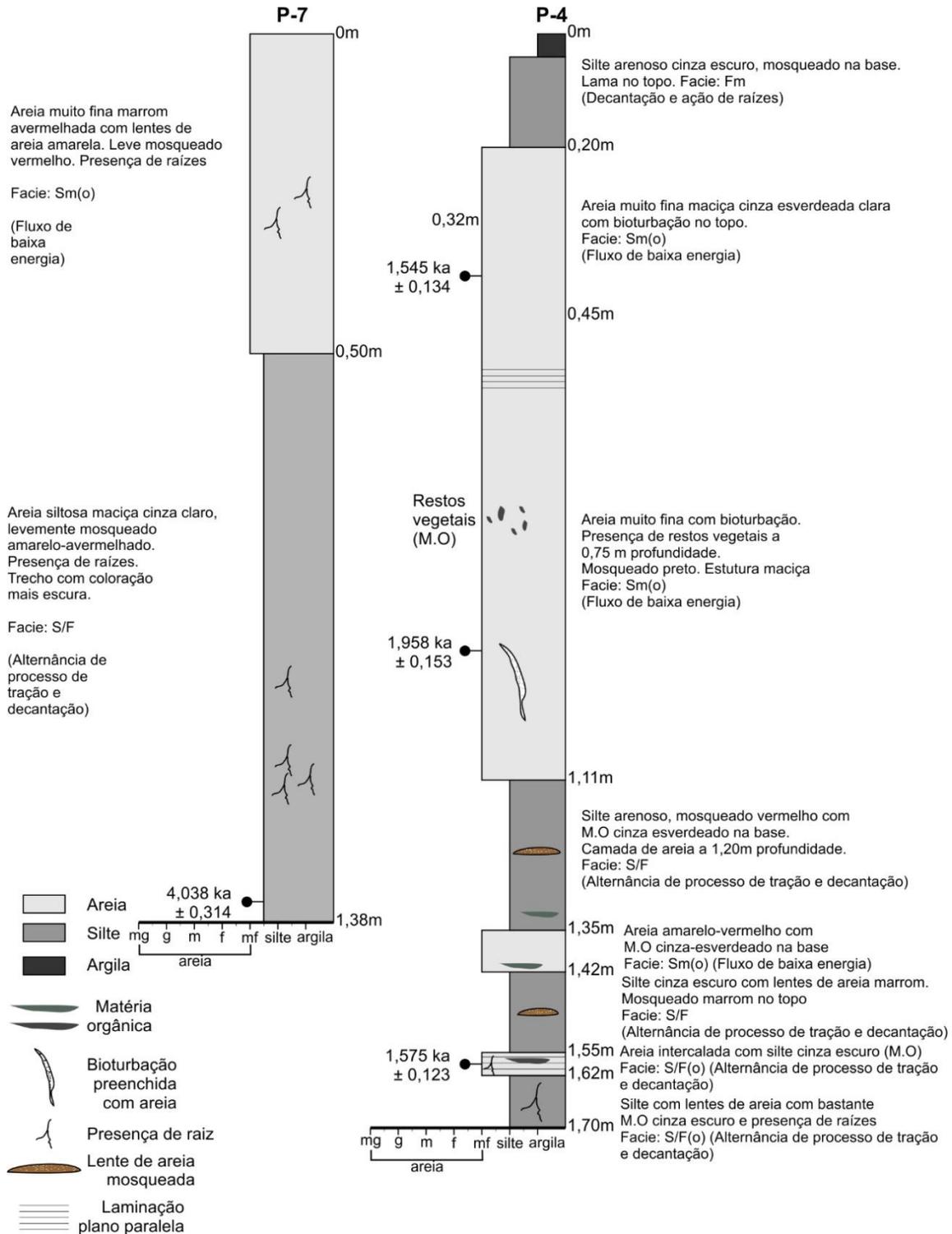
No paleocinturão de meandros a profundidade máxima obtida foi de 3,45 m e mínima de 1,38 m. O paleocinturão foi sondado em duas localidades diferentes. A primeira localidade situa-se nas proximidades da ilha Laranjeira, 110 km a montante da cidade de Corumbá. A segunda região situa-se no rio Paraguai-Mirim, 11 km a montante de sua foz com rio Paraguai. O paleocinturão de meandros apresenta predominância de sedimentos de areia muito fina a areia siltosa. A presença de matéria orgânica é outra característica marcante dessa associação deposicional. Restos vegetais ou camadas orgânicas foram encontrados em um dos testemunhos recuperados nesse compartimento.

Os testemunhos do paleocinturão de meandros (Figura 22) apresentaram fácies com alternância de silte e areia (S/F), o qual é indicativo de alternância de processos de decantação e tração. Isso pode ser um indicativo de que esses depósitos correspondem ao momento de abandono dessa associação morfológica. O furo P-4 apresentou em sua porção basal alternância de depósitos mais grossos, indicativo de ambiente lótico, e depósitos mais finos que indicam processos de decantação alternado com tração. Esse conjunto de fácies parece estar associado a depósitos de barra em pontal evoluindo para espiras de meandro. Os depósitos de areia seriam correspondentes a períodos de águas altas, em que o canal deposita a barra em pontal. Já os sedimentos finos (silte) correspondem a períodos em que a cota do rio está mais baixa.

Os perfis sedimentares dos canais meandrantés na bacia de inundação (Figura 23) apresentaram em sua base depósitos de areia muito fina, indicativos de ambiente de deposição fluvial (face Sm – fluxo de baixa energia). O perfil P-11 apresentou material mais fino acima dos depósitos de canal que estão em sua base. Entre as profundidades de 36 cm e 1,31 m, depósitos que indicam ambiente lântico (face S/F – alternância de tração e decantação) que podem indicar o momento em que esses canais foram abandonados, provavelmente devido à formação do paleocinturão de meandros, foram encontrados. Nos primeiros 36 cm desse testemunho são encontrados depósitos (face Fm – decantação e ação de raízes) indicativos de ambiente da bacia de inundação atual. Apesar de não ter sido

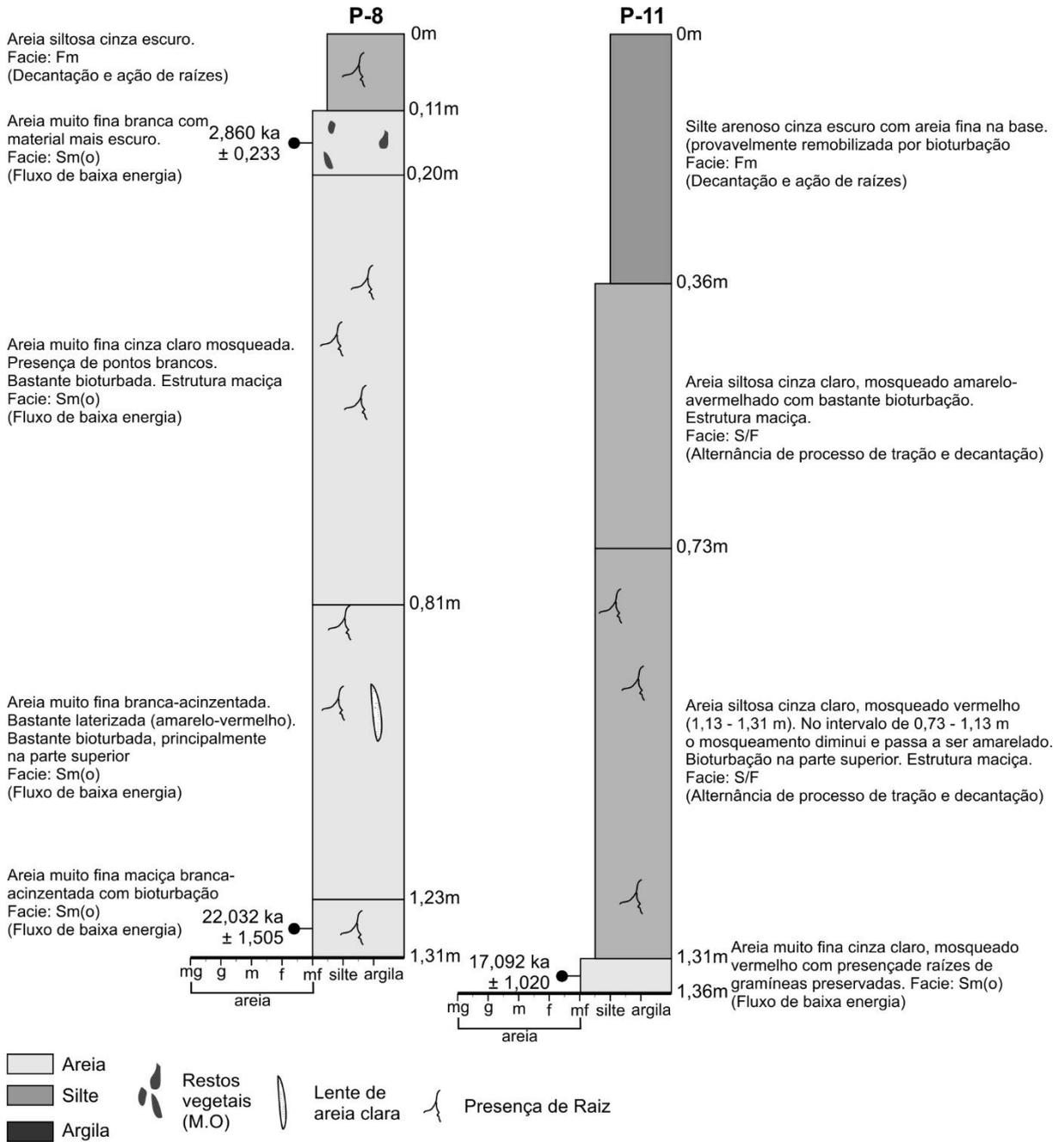
identificada no testemunho, as idades das amostras no furo P-8 apontam uma descontinuidade neste testemunho. Essa discordância deve ter sido criada por processos erosivos na bacia de inundação devido ao fluxo em lençol gerados pelo processo de enchente que ocorre até os dias atuais.

**Figura 22 - Perfis sedimentares do paleocinturão de meandros.**



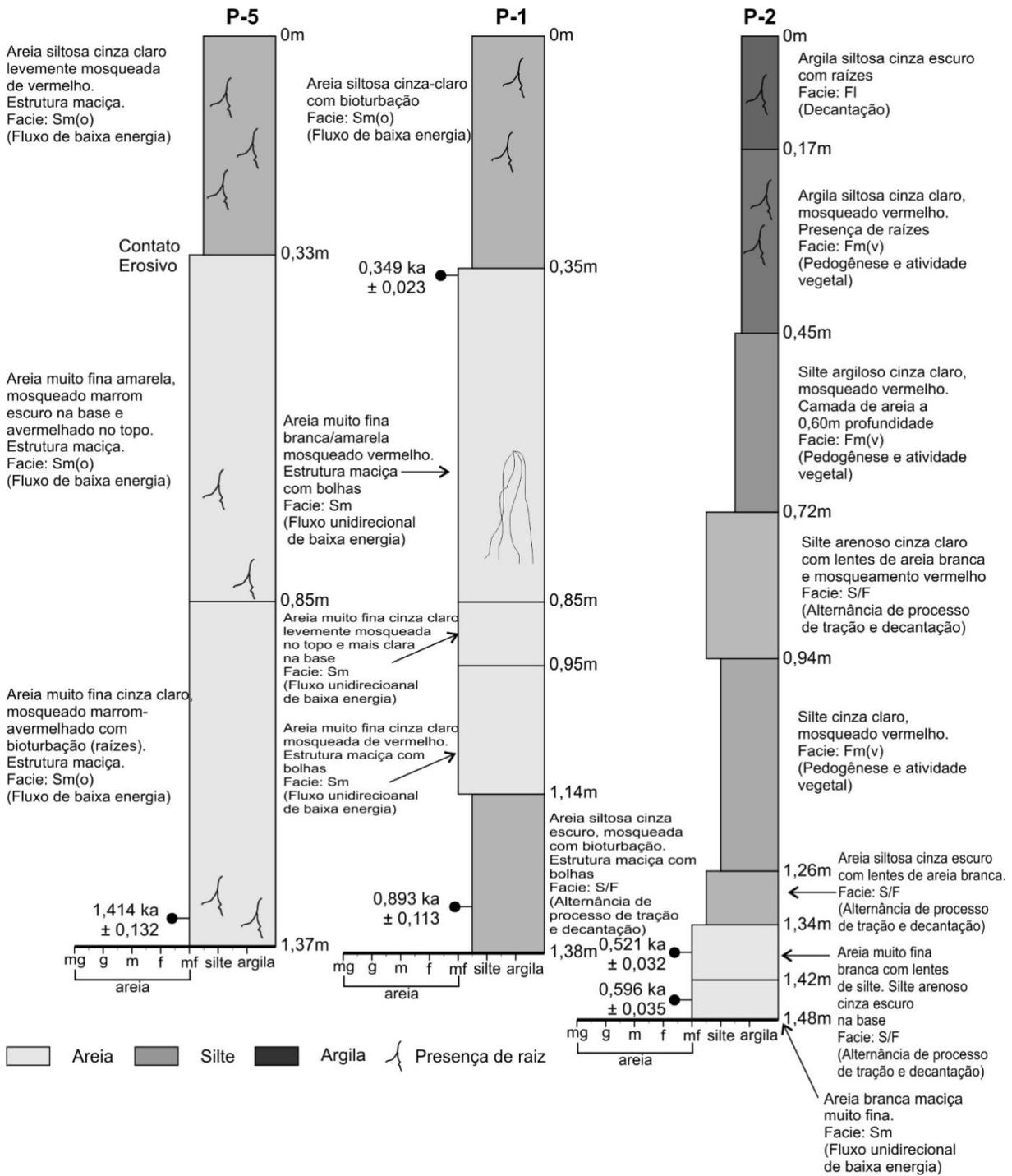
Fonte: Elaborado pelo autor. Localização na Figura 21.

**Figura 23** - Perfis sedimentares dos canais meandrantés na bacia de inundação.



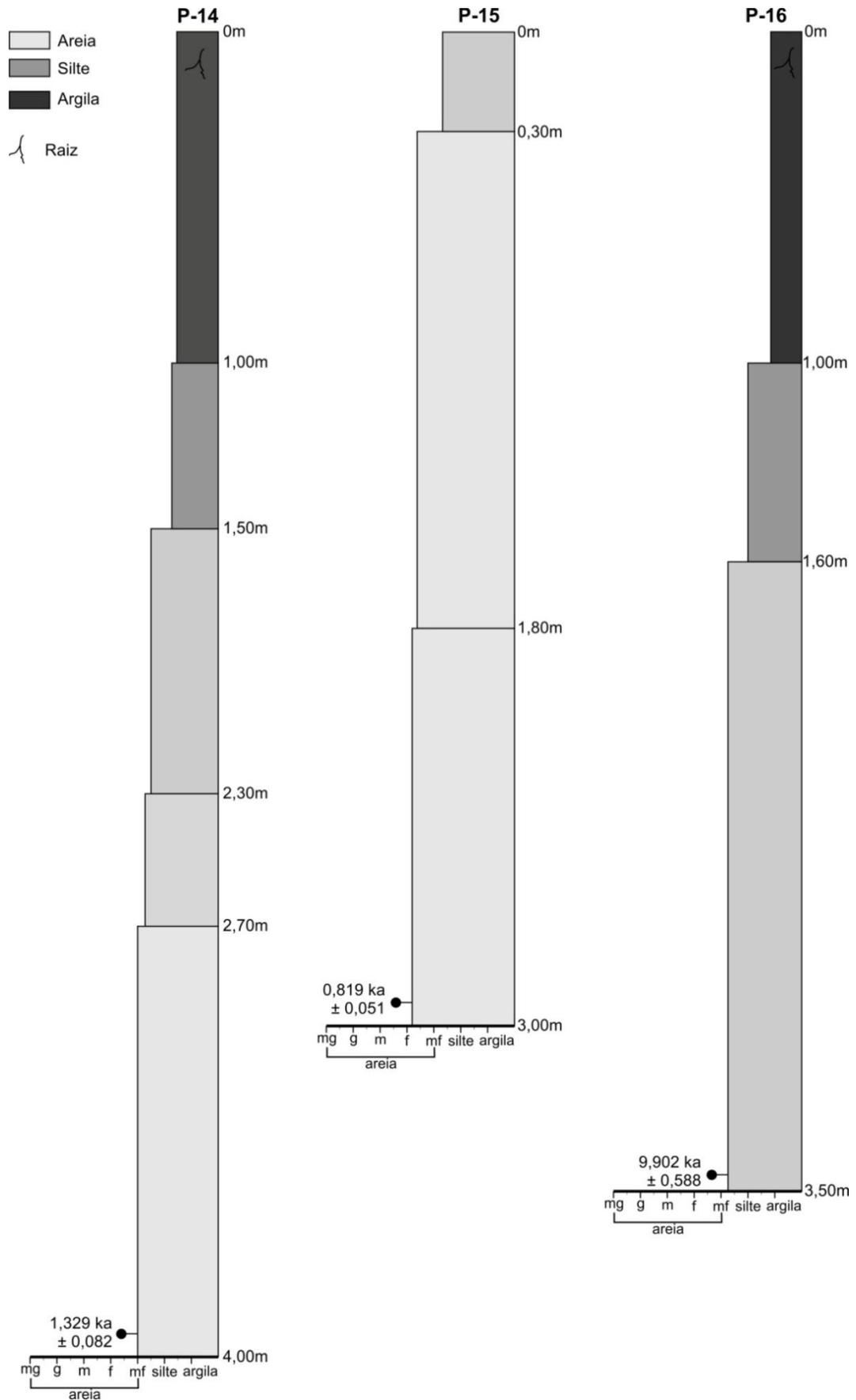
Fonte: Elaborado pelo autor. Localização na Figura 21.

Figura 24 - Perfis sedimentares do cinturão de meandros do rio Paraguai.



Fonte: Elaborado pelo autor. Localização na Figura 21.

**Figura 25** - Perfis sedimentares de testemunhos coletados inicialmente com trado manual.



Fonte: Elaborado pelo autor. Localização na Figura 21.

### 6.2.2. Cronologia dos depósitos

Datações pelo método LOE/SAR foram obtidas em 15 amostras dos onze testemunhos recuperados (Tabela 6). As idades obtidas no cinturão de meandros indicam que essa associação morfológica possui idade holocênica (349 – 1.546 anos AP).

**Tabela 6** – Idades absolutas das amostras coletadas nos testemunhos recuperados na PFPC.

Ponto	Profundidade (m)	Idade (anos AP)	Compart.	Registro LEGaL
P-1	0,36	349±23	Cinturão atual	L0541
	1,31	893±113	Cinturão atual	L0538
P-2	1,37	521±32	Cinturão atual	L0544
	1,44	596±35	Cinturão atual	L0546
P-8	0,14	2.860±233	Bacia de Inundação	L0542
	1,26	22.032±1.505	Bacia de Inundação	L0545
P-11	1,33	17.092±1.020	Bacia de Inundação	L0540
P-7	1,35	4.038±314	Paleocinturão	L0547
P-5	1,33	1.414±132	Cinturão atual	L0548
P-4	0,42	1.545±134	Paleocinturão	L0539
	1,00	1.958±153	Paleocinturão	L0543
	1,56	1.575±123	Paleocinturão	L0537
P-14	3,93	1.329±82	Cinturão atual	L0870
P-15	2,93	819±51	Paleocinturão	L0871
P-16	3,45	9.902±588	Paleocinturão	L0872

Fonte: Elaborado pelo autor. Localização na Figura 21 a Figura 24. AP=antes do presente.

As amostras feitas nos canais meandrantés da bacia de inundação (P-8 e P-11) revelaram idades antigas, próximas do Último Máximo Glacial (UMG), indicando que a bacia de inundação é a morfologia mais antiga da PFPC e que seus depósitos têm idade Pleistocênica.

As idades do paleocinturão de meandros revelam que esse compartimento geomorfológico foi formado em um momento posterior a bacia de inundação (10,5 – 9,3 ka AP) e anterior ao cinturão de meandros que apresenta idade no Holoceno superior (~1.500 anos). A idade obtida para o furo P-4 mostra que o paleocinturão esteve ativo até o Holoceno superior, indicando que ambos os cinturões estiveram ativos nesse período. As amostras coletadas nesse furo apresentaram sobreposição

de idade, muito provavelmente devido a problemas com os valores de umidade da amostra, visto que este parâmetro afeta muito os valores de taxa de dose.

### 6.3. Discussão dos Resultados

Os compartimentos geomorfológicos amostrados revelaram grande diversidade comprovada por morfologias e idades variadas. Apesar dessa diversidade, os sedimentos recuperados possibilitaram o reconhecimento de depósitos formados por eventos cronologicamente distintos e associados a mudanças climáticas.

Os pontos amostrados na bacia de inundação revelaram depósitos arenosos antigos cobertos por camada de sedimento mais fino. Depósitos de canais meandantes foram recuperados na bacia de inundação com marcas de migração lateral que a princípio foram confundidos como sendo parte do paleocinturão existente na área. Esses depósitos apresentaram idades entre 23,5 e 16 ka, contemporâneas a depósitos de canais entrelaçados mapeados nos megaleques dos rios Cuiabá e São Lourenço (PUPIM, 2014).

Embora esses dois padrões de canais apresentem características distintas (entrelaçado X meandrante), pode-se considerar que os canais meandantes reconhecido na bacia de inundação da PFPC são produto das mesmas condições climáticas que produziram os canais entrelaçados existentes nos lobos modernos do megaleque do rio São Lourenço e dos lobos antigos do megaleque do Cuiabá (PUPIM, 2014).

A produção de uma drenagem com padrão entrelaçado é fruto da conjunção de diversos fatores, como aporte sedimentar, declividade, regime pluviométrico da área, energia do fluxo, e estabilidade das margens (PAOLA, 2004; HUGGETT, 2007; CHARLTON, 2008). No caso dos megaleques dos rios Cuiabá e São Lourenço, os canais entrelaçados seriam produtos de um clima mais sazonal com precipitação irregular do final da glaciação. A esse regime climático, somam-se as características topográficas dessa região da bacia que propiciam maior energia ao sistema. Além disso, o aporte sedimentar era, provavelmente, muito elevado, devido a pouca cobertura vegetal deixada pelo clima anterior frio e seco.

No caso da PFPC, o mesmo clima teria produzido um padrão diferente daquele encontrado em áreas proximais da bacia. Isso ocorreu porque, apesar do

regime de precipitação sazonal, a planície está localizada em uma região que coleta mais da metade de toda a água da bacia, uma vez que a área recebe tanto as águas vindas do Norte (rios Cuiabá, São Lourenço, Piquiri e Itiquira) como as águas do flanco leste da BAP (rios Taquari, Negro e Miranda). Portanto, embora as morfologias apresentem características distintas, estas foram construídas sob o mesmo padrão climático.

Além dessa contemporaneidade, os canais meandantes da bacia de inundação também são correlatos (tanto na morfologia como na idade) aos canais meandantes com espiras de meandros existentes na planície degradada do megaleque do Nabileque (KUERTEN, 2010). Canais meandantes com migração lateral (espiras de meandros) foram mapeados na planície degradada do megaleque do Nabileque e apresentaram idades entre 28,7 e 11,5 ka (KUERTEN, 2010), sendo contemporâneos aos canais meandantes da bacia de inundação da PFPC (Quadro 1).

Apesar de não haver amostras que comprovem a idade dos canais-elevados presentes na bacia de inundação, acredita-se que estes sejam contemporâneos aos canais meandantes amostrados na bacia de inundação da PFPC (Figura 23), pois estes últimos são produtos da convergência dos canais-elevados que ocorrem no norte da PFPC.

A idade obtida para o paleocinturão de meandros em um dos testemunhos é do Holoceno médio/superior (P-7). Entretanto, outro testemunho (P-16) apresentou idade próxima da transição Pleistoceno-Holoceno. Essa idade seria correspondente ao momento em que o clima holocênico entraria em vigor no Pantanal (BEZERRA; MOZETTO, 2008; WHITNEY et al., 2011; McGLUE et al., 2012), porém, somente nos últimos 3 mil anos é que o clima atual se impôs sobre o Pantanal. Assim, o paleocinturão teria o início de sua formação entre o Pleistoceno superior e o Holoceno inferior (13 – 10 ka AP), estendendo-se até o final do Holoceno médio (~4 mil anos AP), ou na realidade, até o Holoceno superior, conforme as idades do furo P-4 indicam.

No entanto, morfologia correlata ao paleocinturão de meandros, situada no megaleque do rio Nabileque e onde atualmente flui esse rio (KUERTEN, 2010), apresenta idades mais antigas, variando de 19 a 3,2 ka, o que pode ser um indicativo de que o paleocinturão da PFPC tenha o início de sua construção

contemporaneamente ao final da construção dos canais meandrantés presentes na bacia de inundação da PFPC, podendo ser, portanto, bem mais antigo do que a idade obtida nesta tese mostra.

Embora o Holoceno seja mais úmido que o Pleistoceno, há momentos mais secos que o período atual dentro do Holoceno. Entre 11 – 5,3 ka AP o clima se tornou mais seco e sazonal que o atual, apesar de ser mais úmido que no Pleistoceno (LEDRU et al., 1996; De OLIVEIRA, 1992; WHITNEY et al., 2011; McGLUE et al., 2012). Esse clima mais seco e sazonal pode ser o fator responsável pela agradação do paleocinturão, que culminou na avulsão do rio Paraguai para a posição atual.

Datações feitas no cinturão de meandros do rio Paraguai no Pantanal do Nabileque (KUERTEN, 2010) mostram que a idade dessa morfologia estaria dentro desse período de clima mais seco e sazonal do Holoceno (7 – 6,5 ka). Já as datações feitas no cinturão de meandros do rio Paraguai na PFPC mostraram idades bem mais novas (1.546 – 1.247 anos), contemporâneas as do cinturão do rio Paraguai próximo à Cáceres-MT (SILVA, 2010).

Com base nas idades obtidas para o furo P-4, a partir de ~1.500 anos AP o paleocinturão passa a ser desativado e seus canais progressivamente abandonados até culminar no sistema atual, no qual as águas de inundação da planície são drenadas por meio de fluxo em lençol (*sheet flow*). Desse modo, houve um momento em que ambos os sistemas (cinturão antigo e atual) estavam ativos na drenagem da planície, semelhantemente ao que ocorreu no Pantanal do Nabileque. Assim, o cinturão de meandros ativo tem sua formação e evolução relacionadas às condições climáticas mais úmidas presentes no Holoceno superior.

Considerando o conjunto de dados obtidos na caracterização sedimentar e a geocronologia das formas, um esquema evolutivo mais preciso é proposto neste capítulo. O primeiro evento desse esquema refere-se à formação da drenagem anastomosada em canais-elevados reconhecida na PFPC. As dimensões dos canais dessa drenagem indicam que esse sistema se formou em condições bem mais secas que as atuais e que as do paleocinturão de meandros e, por isso, interpreta-se que essa morfologia foi formada durante o último período glacial, anterior ao UMG (entre 73 e 21 ka AP – Pleniglacial, cf. KASSE et al., 1998). Em região mais ao sul da PFPC, esses canais convergem para formar canais meandrantés com espiras de

meandros semelhantes aos encontrados na planície do Nabileque. As idades dos canais meandantes na bacia de inundação da PFPC corroboram a interpretação de que as formas canal-elevado foram construídas durante o Pleniglacial.

**Quadro 1** - Comparativo entre as áreas estudadas no Pantanal.

Anos AP	Megaleque do Nabileque [Kuerten (2010)]	Megaleques do S. Lourenço e Cuiabá [Pupim (2014)]	Lagoa Gaíva, Negra e Castelo [Mcglue et al. (2012); Whitney et al. (2011); Bezerra e Mozeto (2008)]	Planície Fluvial Paraguai-Corumbá [Esta tese]
10.000	<p>A partir de 6,5 ka processo de avulsão se inicia no rio Paraguai que passará a fluir na direção SSW.</p> <p>Cinturão de meandros é construído pelo antigo rio Paraguai local onde atualmente flui o rio Nabileque. Morfologia esteve ativa até meados de 4000 A.P.</p>	<p>Construção do cinturão de meandros do rio S. Lourenço</p> <p>Marcas de um cinturão de meandros abandonado indicam que o rio S. Lourenço passou por processo de avulsão no ápice do lobo atual</p>	<p>Por volta de 6,5 ka AP a lagoa do Castelo sofre forte deposição de carbono, precedida por um período com maior hidrodinâmica, com elevadas taxas de sedimentação e deposição de sedimentos predominantemente arenosos e inorgânicos. Maior deposição de carbono entre 11,5 - 4,5 ka indica o estabelecimento de condições lacustres na lagoa Negra. Na lagoa Gaíva, este mesmo período é marcado por flutuações no nível da lagoa</p>	<p>Evento de avulsão em 2,5 ka AP conduz rio Paraguai a ter direção SSW.</p> <p>Cinturão de meandros é construído com sentido N-S. Marcas de paleo-canal indicam vazão próxima à do rio Paraguai atual</p>
20.000	<p>Canais meandantes na planície degradada do rio Nabileque indicam condições hidrológicas mais úmidas que as esperadas para o período glacial. Contudo, é importante lembrar que a planície está localizada na região distal do bacia, a qual coleta praticamente toda a água do Pantanal</p>	<p>Canais entrelaçados são construídos nas regiões distais dos megaleques.</p>	<p>Após o UMG, em 19,5 ka AP, a expansão de árvores tropicais sinaliza o início do aquecimento deglacial. Contudo o clima permaneceu mais seco do que o presente até por volta de 13 ka AP.</p>	
30.000			<p>A lagoa Gaíva foi marcadamente mais seca durante o último período glacial (45 - 12,2 ka AP). Entre 45 - 19,5 ka AP, o clima era mais frio e seco, como mostrado pela paisagem aberta com poucas árvores e nível do lago mais baixo</p>	<p>Desenvolvimento da bacia de inundação da PFPC. Canais-elevados anastomosados se espalham pela bacia de inundação. Mais ao sul da bacia, esses canais confluem e formam morfologias meandantes semelhantes aos canais existentes na planície degradada do megaleque do Nabileque</p>
40.000	<p>Sistema distributário na planície aluvial degradada do megaleque do Nabileque</p>	<p>Formação dos primeiros lobos deposicionais do megaleque do S. Lourenço e Cuiabá. Canais entrelaçados se formam nas regiões proximais dos lobos</p>		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final do Pleniglacial e começo do reaquecimento global, o clima na América do Sul sofreu progressivo aumento da temperatura e, em algumas regiões, este também se torna mais úmido, como nos Andes e no sudeste brasileiro (WHITNEY et al., 2011). Durante o UMG, as planícies do leste da Bacia Amazônica eram amplamente mais secas que as planícies ocidentais, com muito menos reciclagem de água e provavelmente reduzida transpiração vegetal, mesmo que a floresta tropical tenha persistido ao longo deste tempo (WANG et al., 2017).

No Pantanal, estudos paleoclimáticos apontam para um aumento da precipitação somente por volta de 13 ka AP (BEZERRA; MOZETTO, 2008; WHITNEY et al., 2011; McGLUE et al., 2012). Mesmo assim, paleocanais entrelaçados foram reconhecidos nos megaleques dos rios Cuiabá e São Lourenço com idades próximas do final do UMG. Essa constatação pode ser um indicativo de que o clima da BAP nessa época era mais úmido que no período antes do UMG.

Análise isotópica de cera de folha em sedimentos da lagoa Gaíva aponta para aumento da umidade na região durante a última deglaciação (FORNACE et al., 2016). Portanto, aumento da temperatura após 19,5 ka AP pode ter causado um regime pluvial sazonal na BAP, que somado a pouca cobertura vegetal deixada pelo clima anterior, propiciou a formação de drenagem com padrão entrelaçado nas áreas proximais do Pantanal (PUPIM, 2014). Na PFPC, esse mesmo clima teria produzido um sistema de drenagem composto por canais meandранtes pelo fato de a área possuir um aporte hídrico bem maior e captar água de quase toda a bacia.

Rede de paleocanais distributários preservada na superfície do antigo leque do rio Cuiabá evidencia atividade fluvial em condições climáticas mais secas durante a última glaciação, anterior ao UMG (PUPIM et al., 2017). Esses canais foram interpretados como registro de um cenário com condições mais secas que produziram fluxos fluviais com alta variabilidade ao longo do ano, com fluxo ocorrendo brevemente durante os meses de verão. Interpretações semelhantes também foram feitas para outras regiões da América do Sul (IRIONDO; GARCÍA, 1993; MAY; VEIT, 2009; LATRUBESSE et al., 2012). Essas condições climáticas são interpretadas como as principais responsáveis pela formação da rede de canal-elevado existente na PFPC.

Outros estudos, utilizando dados de pólen e diatomácea, também corroboram essa interpretação, em que havia um ambiente dominado por gramíneas e

herbáceas durante o último período glacial (40 – 20 ka) no Pantanal, indicando um paleoclima mais seco (WHITNEY et al., 2011; METCALFE et al., 2014; FORNACE et al., 2016)

Apesar da importância desses registros para a interpretação das condições paleoambientais na América do Sul, essas interpretações devem ser tomadas com cautela, visto que muitos dados *proxy* (e.g. assembléia de polens) podem ser muito especulativos (BURBRIDGE et al., 2004). Um exemplo dessa incerteza pode estar relacionado às condições fisiográficas dos locais de amostragem no Pantanal, que em muitos casos são lagoas grandes e rasas que são fortemente influenciadas pelo rio Paraguai (e.g. lagoas Gaíva, Mandioré, Vermelha e Negra). Além do mais, as condições climáticas reconstruídas por meio de mudanças na vegetação para o último período glacial na América do Sul é uma questão extremamente controversa (DE FREITAS et al., 2001; LEDRU et al., 2005).

Registros de isótopos de oxigênio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) em espeleotemas de diversas regiões da América do Sul (CRUZ et al., 2009; CHENG et al., 2013; MOSBLECH et al., 2012; NOVELLO et al., 2017) indicam que condições bastante úmidas persistiram para a SASM durante a maior parte do último período glacial, principalmente durante o UMG. Esses registros indicam a ocorrência de abrupto evento de precipitação milenar devido ao fortalecimento da SASM no princípio do Heinrich 1 (HS1) em ~18,5 ka AP e no Younger Dryas (YD) em ~12,5 ka AP (op.cit.).

Coincidentemente aos dados de espeleotemas que mostram um aumento da precipitação em diversas partes da América do Sul, no final do UGM (HS1) e na transição do Pleistoceno-Holoceno (YD), os canais meandrantés na bacia de inundação da PFPC possuem idade próxima do UMG. Esse fato conduz a uma segunda linha de interpretação para a formação dos canais meandrantés na bacia de inundação da PFPC, que teriam se formado não somente por causa da localização da área em relação à bacia, mas também por causa do aumento da precipitação ocorridas durante o UMG.

Assim sendo, as mudanças climáticas globais e as consequentes mudanças na precipitação, ocorridas nas terras baixas da América do Sul, seriam o principal fator das mudanças no estilo fluvial registrados na PFPC durante o Quaternário tardio. A maior precipitação combinada à localização da PFPC em relação à BAP pode ter aumentado as descargas fluviais durante o evento HS1, e isso pode ser o

que desencadeou a formação dos canais meandantes na bacia de inundação desta área.

Ao final do Pleistoceno (13 – 12 ka AP) o clima no Pantanal se tornou mais úmido (YD) propiciando a formação do antigo cinturão de meandros do rio Paraguai, que na época situava-se mais próximo do megaleque do rio Taquari e fluía quase retilineamente em sentido norte-sul. A julgar pelo tamanho dos paleocanais ainda visíveis nesse compartimento, a vazão do rio Paraguai na época era muito próxima da atual.

Supondo que a idade mais antiga ( $9,902 \pm 0,588$  ka) obtida para o paleocinturão de meandros é a idade mais próxima do início da formação desta morfologia, interpreta-se que o paleocinturão se formou em decorrência do aumento da precipitação na bacia, associado ao evento YD, que desencadeou aumento na descarga líquida no sistema, que levou a construção do padrão meandrante encaixado na planície. Um quadro muito similar de incisão e preenchimento foi relatado para outras áreas no Pantanal ([ASSINE; SILVA, 2009](#); [KUERTEN et al., 2013](#); [ASSINE et al., 2014](#); [PUPIM et al., 2017](#)) sugerindo uma resposta regional dos sistemas fluviais do Pantanal às mudanças abruptas do clima durante fase posterior de deglaciação no Pleistoceno muito tardio.

No Holoceno inferior/médio (11 – 5,3 ka AP) o clima no Pantanal se tornou um pouco mais úmido, mas ainda mais seco que o atual. Oscilações no nível da lagoa Gaíva mostram que esse período foi de um clima sazonal ([WHITNEY et al., 2011](#); [McGLUE et al., 2012](#); [METCALFE et al., 2014](#)). Esse regime climático poderia ter sido o gatilho para a avulsão no rio Paraguai que se deu na proximidade da baía do Castelo. Contudo, as idades obtidas para o cinturão de meandros do rio Paraguai na PFPC mostram que essa morfologia é bem mais nova (~2 – 1,5 ka).

A partir de 1,5 ka AP a drenagem anastomosada produzida pelo rompimento do antigo rio Paraguai dá lugar a um padrão meandrante de canal único que permanece até os dias atuais. Essa nova associação morfológica possui características que indicam que o cinturão de meandros atual é mais energético que os seus antecessores. Por isso, o rio Paraguai atual flui encaixado na bacia de inundação e corta as antigas morfologias presentes na área, como os canais-elevados e o paleocinturão de meandros.

#### 6.4. Conclusões

Os resultados mostram que a PFPC é formada por: 1) Paleocinturão de meandros, formado ao final do Pleistoceno e início do Holoceno; 2) Um cinturão de meandros ativo formado no Holoceno superior; 3) Bacia de inundação do rio Paraguai que apresenta paleoformas de canais-elevados formados anteriormente ao UMG (>26,5 ka AP) e canais meandrantés que se formaram por conta do aumento da precipitação no UMG e também devido às características da área em relação a toda bacia.

Dessa forma, a PFPC é uma superfície composta por três unidades geomorfológicas de diferentes idades e características deposicionais. Sua evolução é marcada por mudanças nos estilos de drenagem, que foi regida por alterações climáticas, as quais transformaram a paleogeografia de toda a bacia.

Com base no conjunto de dados do mapeamento realizado na área estudada, referentes às feições geomorfológicas fluviais, os depósitos sedimentares e as datações LOE, três períodos significativos na evolução geomorfológica da PFPC puderam ser inferidos. Esses períodos se relacionam com eventos climáticos ocorridos durante o Quaternário tardio.

O primeiro período ocorreu no Pleistoceno, anteriormente ao UMG. Esse período corresponde ao momento em que a temperatura, em todo o planeta, era pelo menos 5° C mais baixa que atual e que baixa pluviosidade acompanhava esse clima mais frio. Essa característica climática favoreceu a formação de uma rede de drenagem anastomosada construída por canais-elevados fluindo sobrepostos à bacia de inundação. Ao sul da área, os canais-elevados convergem e formam canais meandrantés maiores e com espiras de meandros.

Ao final do Pleniglacial superior (19,5 ka AP), quando o progressivo aumento da temperatura global acarretou em um clima um pouco mais úmido e sazonal, canais meandrantés foram produzidos na bacia de inundação. Esse clima causou mudanças na dinâmica fluvial levando à formação de canais com padrão entrelaçado nas áreas proximais do Pantanal, em virtude da alta receita sedimentar e ao regime pluviométrico sazonal. A PFPC situa-se em região central da BAP, e em razão disso, seu regime hidrológico favoreceu a construção de um sistema de drenagem diferente das áreas proximais. Com maior receita hídrica, a PFPC pôde,

nesse momento, construir um sistema de drenagem com canais meandantes, apesar da relativamente baixa pluviosidade na bacia.

Contudo, dados de espeleotemas em diversas regiões na América do Sul indicam que o UMG foi mais úmido do que se pensava anteriormente. Essas novas descobertas mostram que a formação dos canais meandantes na bacia de inundação da PFPC não seriam apenas produto da localização da área em relação à bacia, mas que o aumento da umidade teria causado mudanças na dinâmica hidrológica da área, que passa a ter descargas fluviais bem mais elevadas que o último período glacial (40 – 20 ka AP).

À medida que o clima foi ficando mais quente e úmido, a drenagem da PFPC foi se tornando mais eficiente e a antiga drenagem foi dando lugar a um cinturão de meandros entalhado na bacia de inundação, que nos dias atuais ainda participa da drenagem da área. Essa feição deve ter se formado por volta de aproximadamente 13 ka AP e esteve ativa até 1,5 ka AP.

Com a progressiva melhora no clima global, o Pantanal se torna cada vez mais úmido e sua drenagem fica cada vez mais parecida com a atual. Por volta dos 3 a 2 ka AP, o clima mais úmido causou aumento da descarga fluvial conduzindo a processos de rompimento e extravasamento do rio Paraguai na altura da baía do Castelo. Isso evoluiu para a avulsão que culminou na atual configuração do rio Paraguai na área estudada. Em um primeiro momento, esse novo canal do rio Paraguai deve ter tido uma drenagem mal definida com diversos canais surgindo ao longo da bacia de inundação e fluindo em direção a borda da bacia, onde encontrou o bloco falhado da Formação Tamengo, em área onde atualmente está a lagoa de Cáceres. Essa nova drenagem foi aos poucos se tornando mais expressiva e o padrão anastomosado deu lugar ao canal único meandrante que existe hoje.

A partir de 1.500 anos AP, o rio Paraguai assumiu sua posição atual e seu antigo curso é abandonado, transformando-se em uma morfologia relictica que ainda hoje participa da drenagem da área, escoando as águas que extravasam do rio Paraguai.



## 7. DINÂMICA HIDROSSIDIMENTOLÓGICA E ANÁLISE DA GEOMETRIA HIDRÁULICA DA PLANÍCIE FLUVIAL PARAGUAI-CORUMBÁ

Neste capítulo, a caracterização e a modelagem matemática dos aspectos hidrossedimentares do canal e da planície do rio Paraguai foram realizadas no intuito de ampliar e melhorar a compreensão deste importante sistema fluvial do Pantanal.

Os trabalhos foram apoiados em dados hidrossedimentares existentes na literatura e em bases de dados hidrológicos (ANA, 2016) e também em dados coletados em campanhas de campo (Figura 26).

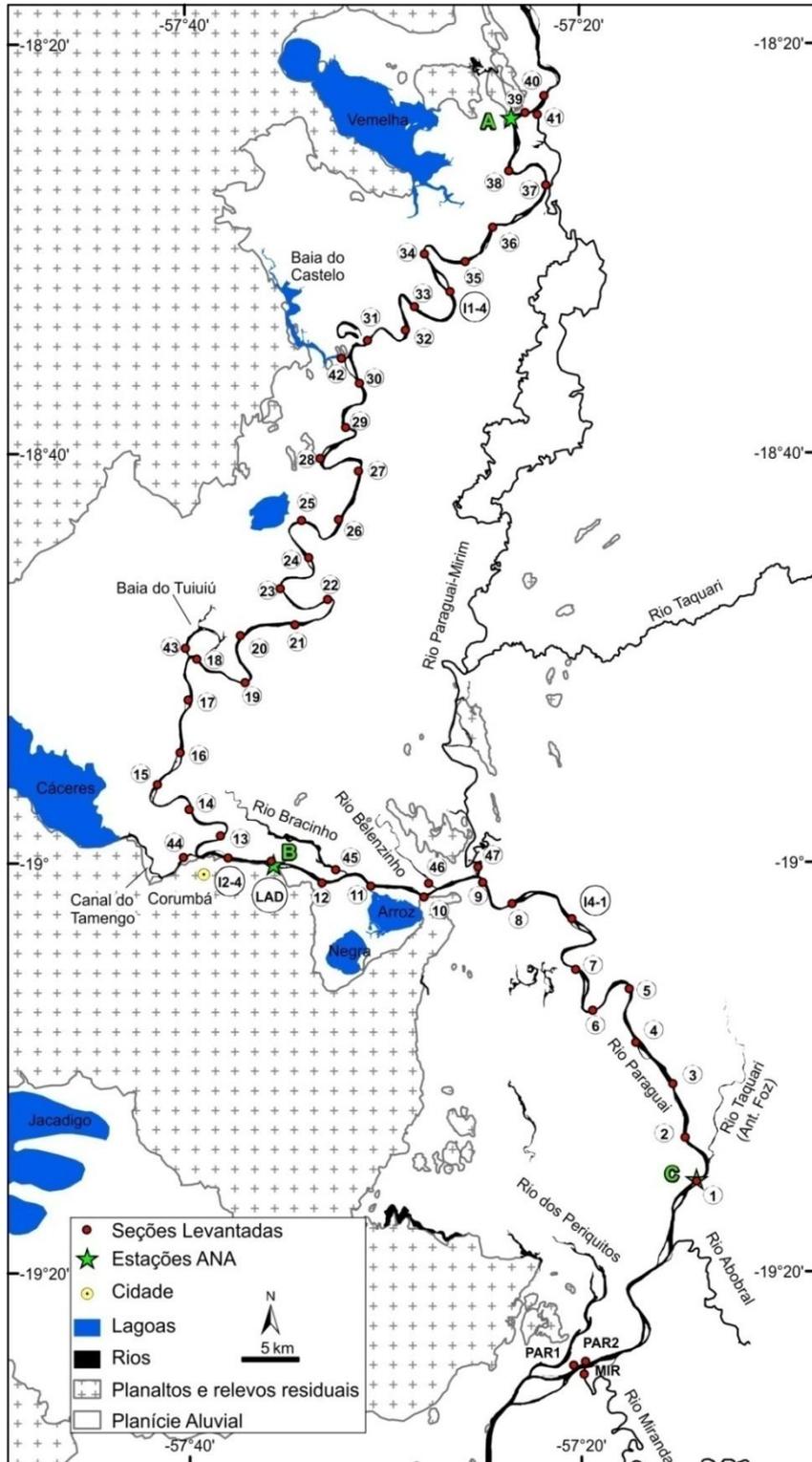
A análise realizada parte da premissa de que o volume de escoamento das águas e a produção de sedimentos na bacia alteram-se com intervenções na cobertura vegetal e é no canal, que os ajustes necessários para a retomada do equilíbrio, após tais intervenções, ocorrerão (LEOPOLD; MADDOCK, 1953).

As descargas nos sistemas fluviais são compostas pela combinação de duas fases: uma líquida, cujo comportamento determina a forma de transporte dos sedimentos e outra sólida, em que os fluxos respondem pela competência no tamanho das partículas, podendo modificar a dinâmica do canal (SILVA; WILSON, 2005).

Dessa forma, os trabalhos realizados nesta parte da tese seguiram duas abordagens: na primeira, discutiu-se a hidrossedimentologia (WOLMAM; MILLER, 1960) do sistema, na qual foi realizada uma discussão sobre a vazão formativa dos canais fluviais; e em um segundo momento, a geometria hidráulica (LEOPOLD; MADDOCK, 1953) do canal do rio Paraguai foi tratada .

Os objetivos principais deste capítulo são: 1) Caracterizar a dinâmica hidrossedimentológica do sistema (transporte de sedimentos no canal e as trocas hídricas e sedimentares entre canal e bacia de inundação); 2) Determinar a vazão efetiva, vazão dominante e de margens plenas (*bankfull*) nas estações existentes e associar tais parâmetros à vazão formativa do canal; 3) Definir as relações de geometria hidráulica nas estações fluviométricas presentes na área e nas seções levantadas em campo.

**Figura 26** - Localização das seções levantadas em campo e das estações da ANA.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) São Francisco; B) Ladário; C) Porto da Manga.

## 7.1. Conceitos e métodos

Leopold e Maddock (1953) propuseram equações matemáticas que retratam o comportamento das variáveis geométricas e hidráulicas com relação ao aumento da vazão, em uma determinada seção fluvial (*at-a-station*) e entre duas seções (*downstream*) de um trecho fluvial. Os autores concluíram que é possível determinar os três parâmetros hidráulicos (largura, profundidade e velocidade) de um canal a partir de funções potenciais:

$$L = aQ^b \quad [\text{Eq.2}]$$

$$P = cQ^f \quad [\text{Eq.3}]$$

$$V = kQ^m \quad [\text{Eq.4}]$$

Nessas funções  $Q$  é a vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $L$  é a largura em metros,  $P$  é a profundidade média em metros, e  $V$  é a velocidade média em  $\text{m}/\text{s}$ . As letras  $a$ ,  $c$ ,  $k$ ,  $b$ ,  $f$ ,  $m$  são constantes numéricas que devem ser determinadas a cada caso. Os expoentes  $b$ ,  $f$  e  $m$  das funções definem a inclinação da linha gráfica quando posta em escala logarítmica. Como a vazão é definida pelo produto das três variáveis ( $Q = L.P.V$ ) a seguinte relação entre os expoentes e os coeficientes pode ser definida:

$$b + f + m = 1 \quad [\text{Eq.5}]$$

$$a . c . k = 1 \quad [\text{Eq.6}]$$

Foi verificado que tanto na geometria hidráulica *at a station* como na *downstream*, a velocidade e as demais variáveis modificam-se com o acréscimo da descarga. Esse aumento da velocidade a jusante é explicado pelo fato de que o aumento na profundidade supercompensa a diminuição na declividade (LEOPOLD; MADDOCK, 1953).

As variáveis profundidade média, largura e velocidade média do rio Paraguai foram plotadas contra os valores de descarga líquida, obtendo-se os expoentes e os coeficientes das funções potenciais. A geometria hidráulica a jusante foi determinada utilizando-se as seções levantadas em campo, tanto no período úmido como seco.

Para a análise da hidrossedimentologia da PFPC, levantamentos hidrossedimentares foram realizados ao longo do rio Paraguai (Figura 26; Tabela 9 e Tabela 10) em dois períodos hidrológicos (cheia e seca). Além disso, dados hidrossedimentares das estações fluviométricas da ANA (São Francisco, Ladário e Porto da Manga) também foram analisados.

Dados de descarga líquida e cota do rio Paraguai nas estações ANA foram obtidos na base de dados ANA-Hidroweb. Esses dados são disponibilizados pela agência tanto em formato \*.mdb (Microsoft Access) como em formato \*.txt, os quais podem, em última instância, serem convertidos para o formato do Microsoft Excel (\*.xlsx). Ambos os dados de vazão e cota do rio podem ser baixados em um único arquivo, em que se encontram também os dados para o cálculo da geometria hidráulica de cada estação fluviométrica. O arquivo está descrito no Hidroweb como “resumo de descargas” e foi exatamente esse o utilizado para o cálculo, tanto da geometria hidráulica (Figura 41 [p.134]), como das relações cota-vazão das três estações na área estudada (Figura 28 [p.98]).

Das estações fluviométricas da ANA existentes na PFPC, duas monitoram a concentração de material suspenso: São Francisco e Porto da Manga. Os valores de concentração de sedimento suspenso foram plotados contra a descarga líquida, e assim a relação entre sedimento suspenso X vazão foi obtida. Isso permitiu o cálculo da descarga sólida suspensa nas duas estações fluviométricas. Os dados de medição de concentração de sedimento suspenso foram utilizados para se estimar a quantidade de sedimento que é transferido para a bacia de inundação do rio Paraguai e avaliar o comportamento hidrossedimentológico do sistema canal-planície da PFPC.

Sedimento suspenso também foi coletado nas seções levantadas em campo e esses dados serviram para caracterizar o balanço sedimentar do rio Paraguai e estimar as trocas sedimentares entre canal e bacia de inundação. Os valores de concentração de sólidos suspensos e dissolvidos são referentes à parte mais superficial da seção levantada na cheia, pois as amostras foram coletadas na profundidade de 20 cm. As amostras foram assim coletadas para que fosse possível se calcular a transferência de sedimento para a planície. Dessa maneira, a quantidade de sedimento suspenso e dissolvido transferida para a planície foi calculada nos trechos onde o rio perde água.

Um total de sessenta e seis (66) seções transversais foi levantado em campo (Figura 26 [p.90]) com uso de *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), em que foram coletados dados de velocidade e direção de fluxo e geometria do canal, além de dados sedimentológicos (carga suspensa, dissolvida e de leito) que foram coletados com respectivos amostradores. Das sessenta e seis seções, quinze foram feitas em ilhas existentes no rio Paraguai, locais estes onde o rio se torna multicanal. Essas seções serão utilizadas no capítulo 8 desta tese, o qual apresenta um estudo preliminar da morfodinâmica do rio Paraguai nesses locais.

Os dados levantados com ADCP foram empregados para se calcular parâmetros hidráulicos de cada seção, os quais caracterizam o regime de fluxo do rio. Para tanto, foram calculados os números de Reynolds e Froude de cada seção levantada. O primeiro determina se o fluxo é laminar ( $Rey < 500$ ), em transição ( $500 < Rey < 2.500$ ) ou turbulento ( $Rey > 2.500$ ). O segundo parâmetro determina se o fluxo é tranquilo ( $F < 1$ ) ou rápido ( $F > 1$ ) (também denominados de subcrítico ou supercrítico, respectivamente). Esses parâmetros são calculados por meio das seguintes expressões:  $Rey = \frac{VR\rho}{\mu}$  [Eq.7], em que  $V$  é a velocidade do fluxo em m/s;  $R$  é o raio hidráulico em metros;  $\rho$  é a densidade do fluido em kg/m<sup>3</sup>; e  $\mu$  é a viscosidade cinemática do fluido em m<sup>2</sup>/s; e  $F = \frac{V}{(g.h)^{1/2}}$  [Eq.8], em que  $g$  é a aceleração da gravidade em m/s<sup>2</sup>; e  $h$  é a profundidade média em metros.

Para a determinação da descarga sólida total do rio Paraguai, três tipos de medições foram realizados: 1) Carga dissolvida; 2) Carga suspensa; 3) Carga de leito (rolamento, arraste e saltação). Em todas as seções, uma amostra de cada tipo de carga sedimentar foi coletada. Para o sedimento suspenso e dissolvido, uma amostra de 250 ml foi coletada. O sedimento suspenso foi analisado com uso de um espectrofotômetro (Hach DR2800™) e a concentração de sedimento dissolvido foi estabelecida a partir da condutibilidade elétrica da amostra (YSI 556 MS™). A carga de leito foi analisada pelo método do peneiramento e os tamanhos característicos da amostra ( $D_{50}$  e  $D_{90}$ ) foram estabelecidos. Os dados de descarga líquida e concentração de sedimento foram usados para se calcular a descarga sólida suspensa e dissolvida (Tabela 11 [p.115] e Tabela 12 [p.117]).

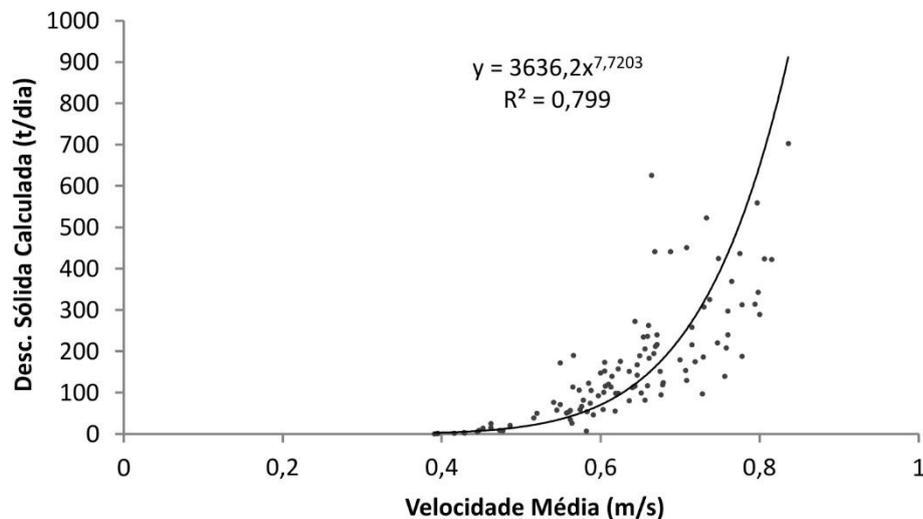
Dados que possibilitem a estimativa do transporte de sedimento de fundo (descarga sólida de leito) não existem em nenhuma das estações fluviométricas da

ANA. Dessa forma, levantamentos em campo (geometria do canal, velocidade de fluxo e material de fundo) permitiram a estimativa do transporte de carga de leito, com uso de modelo matemático. Para essa tarefa, o modelo de [Van Rijn \(1984\)](#) foi utilizado, já que este possui características de calibragem semelhantes às do rio Paraguai (regime de fluxo e tamanho das partículas). Dependendo das características hidráulicas e sedimentares, outros métodos podem ser aplicados, tais como o de Einstein; Acker & White (I, II, III); Yang Sand, Yang Gravel, Yang Sand & Gravel; Laursen; Rottner; Toffaleti; Kalinske; e Schoklitsch. Contudo, essa escolha deve ser cautelosa, visto que cada modelo é mais bem apropriado para determinadas características. Maiores detalhes a respeito do método de Van Rijn podem ser vistos em [Macedo et al. \(2017a\)](#). Os dados de velocidade de fluxo, geometria do canal, temperatura da água e carga de leito foram utilizados para o cálculo da descarga sólida de leito do rio Paraguai e seus afluentes.

Os valores de descarga sólida de leito foram utilizados para se estimar o balanço sedimentar do rio Paraguai (Figura 35 [p.119] a Figura 37 [p.124]). O balanço sedimentar (carga de leito) do trecho entre cada seção levantada em campo foi calculado por meio da descarga sólida de leito da seção a montante subtraída da descarga sólida de leito da seção a jusante. Se o valor dessa operação for maior que zero (entra mais sedimento do que sai) significa que o trecho apresenta balanço positivo, e portanto, ocorre deposição de sedimento de fundo. Caso a operação apresente valores menores que zero, o trecho analisado possui balanço negativo, e conseqüentemente, ocorrerá erosão. O mesmo procedimento foi tomado para análise das trocas sedimentares entre canal e bacia de inundação.

Obtidos os valores de descarga sólida de leito, estes foram plotados contra a velocidade média do fluxo (Figura 27). A partir disso, foi constatado que é possível estimar essa descarga sólida utilizando-se apenas a velocidade média do fluxo por meio de uma função potencial. Essa função foi utilizada para calcular a descarga sólida de leito nas estações São Francisco e Porto da Manga, uma vez que essas estações possuem dados de perfil transversal que permitiram a determinação da descarga de margens plenas. Além disso, as descargas sólidas de leito possibilitaram a determinação da descarga efetiva nas duas estações. Ambas as descargas (*bankfull* e efetiva), juntamente com a vazão dominante, foram analisadas e comparadas para a determinação da vazão formativa do canal.

**Figura 27** - Relação entre a descarga sólida de leito e a velocidade média do fluxo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A vazão formativa do canal do rio Paraguai na PFPC foi avaliada com base nos registros hidrológicos (vazões diárias), morfológicos (perfil transversal das estações) e também com base nos valores de descarga sólida de leito (Tabela 11 [p.115] e Tabela 12 [p.117]). Com base na geometria hidráulica das três estações fluviométricas (ver item 7.3 – Figura 41 [p.134]), foi possível determinar a descarga sólida de leito em função da descarga líquida.

A análise da geometria hidráulica da estação Ladário (Figura 41 [p.134]) mostra que nessa estação a velocidade média do fluxo é ajustada a duas curvas em função da vazão, o que leva a dois valores de velocidade distintos apresentarem o mesmo valor de vazão. Essa condição levaria um único valor de vazão a apresentar dois valores de velocidade do fluxo, e conseqüentemente, duas possibilidades de descarga sólida (cf. Figura 27), impedindo, assim, o uso desta estação no cálculo do transporte de carga de fundo. Portanto, as análises de frequência de vazão serão realizadas apenas nas estações fluviométricas de São Francisco e Porto da Manga, que possuem relação (velocidade X vazão) ascendente (pelo menos dentro da faixa de abrangência da relação cota-vazão, no caso de São Francisco) entre cota e a vazão e, por conseguinte, uma única possibilidade de descarga sólida em função da vazão.

Para a determinação da vazão efetiva é necessário, primeiramente, determinar as frequências das vazões diárias de cada estação. Para isso, dados de

cota diária foram tabulados, os quais serviram para o cálculo das vazões diárias com uso das relações cota-vazão (Figura 28 [p.98]). As vazões foram então usadas para se determinar as descargas sólidas de leito (Figura 41 [p.134] e Figura 27 [p.95]).

A partir das informações da curva de permanência e taxas de transporte de sedimento, gráficos de distribuição das frequências de vazões líquidas em função da vazão sólida, equivalentes aos respectivos períodos de registros, foram elaborados. O pico dessa curva gráfica indica a descarga efetiva (BIEDENHARN; COPELAND, 2000; CROWDER; KNAPP, 2005).

A curva de permanência foi obtida a partir dos dados de vazões diárias de cada série histórica e corresponde à curva acumulativa de frequência dos valores de descarga líquida, indicando a porcentagem de tempo em que uma determinada vazão foi igualada ou ultrapassada durante o período de observação (PINTO, 1976; NAGHETTINI; PINTO, 2007). Em razão da grande quantidade de registros de vazões, o número de classes foi definido como sendo igual a  $\sqrt{N}$  [Eq.9], em que  $N$  é o número de valores da série diária. O tamanho de cada classe foi definido como  $[(max - min)/\sqrt{N}] \uparrow$  [Eq.10], em que  $max$  é o maior valor da série;  $min$  é o menor valor da série; e  $\uparrow$  significa arredondar para cima.

As vazões diárias foram então ordenadas decrescentemente ( $m$ ) e essa ordem foi dividida pelo número de dias de registro e multiplicado por cem ( $100(m/N)$ ) [Eq.11], conforme é descrito em Naghettini e Pinto (2007), obtendo-se assim as curvas de permanência de cada estação fluviométrica.

A quantidade e o intervalo de classes das vazões foram determinados e para cada classe foi calculada sua frequência absoluta, que corresponde ao número de vezes que o intervalo da respectiva classe aparece na série. A descarga sólida foi então calculada para cada classe e, em seguida, multiplicada pela frequência, obtendo-se assim o valor da descarga sólida que a classe transportou na série de registro. A classe de vazão que transportar a maior quantidade de sedimento é considerada a vazão efetiva. A descarga sólida de leito foi utilizada pelo fato de esta ser a responsável pelas mudanças morfológicas no canal (LEOPOLD, 1994; KNIGHTON, 1998; LENZI et al., 2006).

## 7.2. Hidrossedimentologia do sistema Paraguai-Corumbá

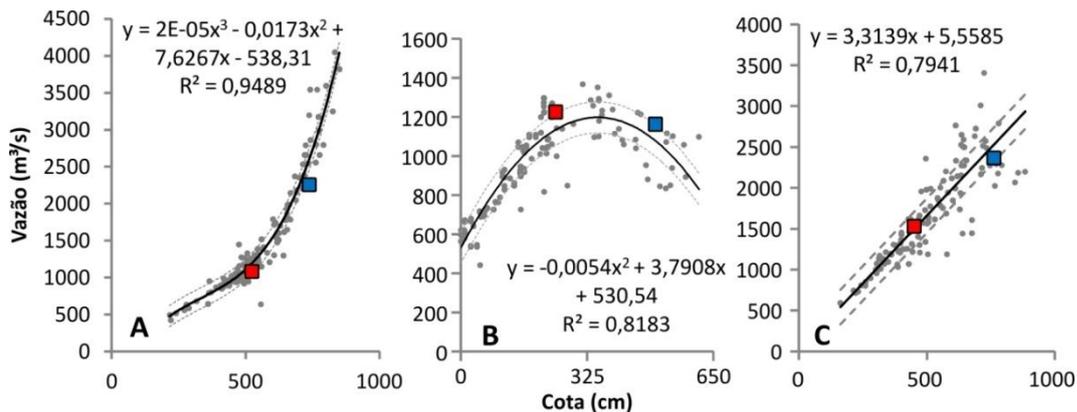
Estudos de hidrossedimentologia são empregados em diferentes áreas, desde a avaliação de condições de navegabilidade, obras hidráulicas, transporte de nutrientes e poluentes agregados ao sedimento, até no assoreamento de canal e de reservatórios (CARVALHO, 2008). Medidas de carga suspensa e de leito são abordagens referentes à geomorfologia fluvial e servem para avaliar a hidrossedimentologia do canal.

Diversos trabalhos se propõem a estudar a hidrossedimentologia de diversas bacias hidrográficas do Brasil, desde a Amazônia (e.g. MEADE, 1994; FILIZOLA et al., 1997; LATRUBESSE; FRANZINELLI, 2005; LATRUBESSE, 2008); bacia do rio Paraná (e.g. MARTINS; STEVAUX, 2005; STEVAUX et al., 2009; BIAZIN, 2005; BARROS, 2006; KUERTEN et al., 2009) ao rio São Francisco (LIMA et al., 2001). No Pantanal, esses estudos ainda são poucos e, em sua maioria, lidam apenas com transporte de sedimento suspenso (e.g. ASSINE et al., 2015a), pelo fato de ser o único tipo de carga sólida monitorada pela ANA.

Para se estudar a hidrossedimentologia de um sistema fluvial, é primordial se estabelecer a relação cota-vazão do rio estudado. A relação cota-vazão das três estações fluviométricas na área estudada apresenta características peculiares (Figura 28 [p.98]). A estação São Francisco foi a única que se ajustou a uma função polinomial de terceira ordem. Nessa estação, as vazões aumentam de forma mais suave no intervalo de cota de 217-550 cm. Ao atingir a cota de  $\approx 600$  cm, as vazões passam a sofrer um acréscimo mais acentuado.

Portanto, duas declividades distintas podem ser visualizadas na relação cota-vazão da estação São Francisco. Essa quebra de declividade na relação cota-vazão pode, em alguns casos, estar relacionada com a cota de margens plenas. Contudo, esse não é o caso dessa estação, como será visto mais adiante. De toda forma, essa é uma característica marcante da estação São Francisco, em que as vazões aumentam expressivamente a partir da cota de 600 cm, mesmo não havendo um grande aumento na cota.

**Figura 28** - Relação cota-vazão das três estações fluviométricas ANA.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) São Francisco; B) Ladário; C) Porto da Manga. Os quadrados indicam as medidas de vazão das campanhas de campo feitas em Agosto de 2014 (azul) e Novembro de 2015 (vermelho).

A relação cota-vazão da estação Ladário é a que apresenta o comportamento mais peculiar de todas. Nessa estação a curva obedece a uma parábola (polinômio de segunda ordem) que tem seu ápice na cota 351 cm (Figura 28B). Até esse nível, as vazões crescem em função da cota. Em cotas maiores que 351 cm e menores que 650 cm, a vazão do rio Paraguai passa a decrescer em função da cota.

O padrão da relação cota-vazão da estação Ladário difere muito das outras duas estações e até mesmo do que é esperado para qualquer rio, uma vez que, de modo geral, as vazões tendem a aumentar em função da cota. O comportamento hidráulico anômalo representado pela relação cota-vazão da estação Ladário pode, a princípio, ser interpretado como um erro nas medidas realizadas pela ANA. No entanto, as medições realizadas nesta pesquisa (quadrados coloridos apontados na Figura 28) mostram que esse comportamento é o que realmente acontece nessa estação. A medida de vazão realizada em agosto de 2014 (período de cheia) foi de 1.162 m<sup>3</sup>/s, em um momento que a cota do rio estava em 500 cm (quadrado azul), vazão ligeiramente inferior ao da medição feita em novembro de 2015 (1.222 m<sup>3</sup>/s), período de seca, em que a cota do rio estava abaixo de 300 cm.

Esse comportamento anômalo da estação Ladário parece estar associado ao fenômeno hidrológico de remanso. O efeito remanso é uma parte de um rio no qual existe pouco ou nenhum fluxo. Esse fenômeno pode ser entendido como o aumento da elevação da superfície da água a montante de um rio, como resultado da obstrução do fluxo. O aumento da cota pode ser produzido por obstrução temporária, como blocos de gelo ou vegetação, ou pela inundação do fluxo a

jusante. A hipótese da existência desse fenômeno no rio Paraguai já foi levantada por outros pesquisadores (COLLISCHONN et al., 2005; MACEDO et al, 2017b) e pode ser explicada nesta área tanto por fatores hidrológicos como por fatores geológicos (e.g. ASSINE et al., 2015b).

A explicação hidrológica para esse fenômeno estaria no fato de o rio Paraguai possuir, no trecho entre Ladário e Porto da Manga, uma dinâmica de enchimento reverso (de jusante para montante). Esta pode ser atestada quando as hidrógrafas das três estações são comparadas (Figura 29). A estação Porto da Manga atinge seu ponto de vazão máxima um mês após a estação São Francisco, porém, quando as águas vindas do norte da bacia alcançam Porto da Manga, esta já se encontra com vazão quase máxima, fato este provocado pelas águas que chegam ao rio Paraguai pelo flanco leste da BAP (rios Taquari e Negro). Dessa forma, o trecho do rio Paraguai entre Ladário e Porto da Manga causaria o barramento das águas vindas do Norte (São Francisco), provocando assim, o remanso reconhecido na relação cota-vazão de Ladário.

Outra explicação para o remanso identificado no rio Paraguai, entre Ladário e Porto da Manga, seria a configuração geológica da porção sul da PFPC. A área estudada é marcada por uma ampla bacia de inundação que se estende desde a estação São Francisco até a confluência do rio Miranda. Em sua porção mais meridional, a planície torna-se mais estreita e confinada entre os relevos montanhosos do Maciço do Urucum e da Serra da Bodoquena (ASSINE et al., 2015b), configurando assim, um importante controle geológico da área (gargalho ou *bottleneck*). Esse controle retardaria o escoamento no rio Paraguai e provocaria a diminuição da vazão do rio em Ladário.

A relação cota-vazão da estação Porto da Manga foi a única que se ajustou a uma reta. Essa curva foi a que apresentou o menor índice de correlação ( $R^2=0,7941$ ) devido ao alto grau de dispersão das medições. O alto grau de dispersão dos pontos dessa curva pode ser resultante do efeito remanso presente neste trecho do rio Paraguai.

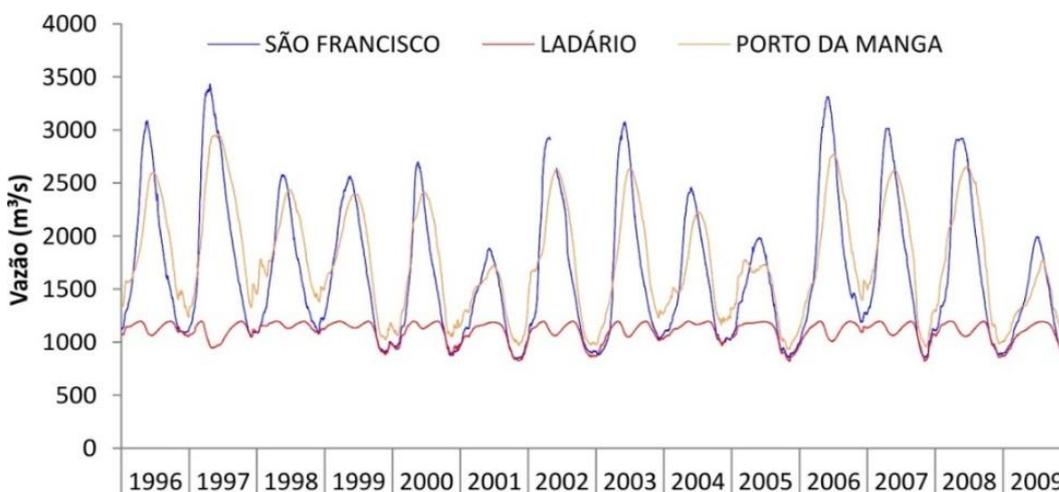
### 7.2.1. O Regime Hidrossedimentar da planície Paraguai-Corumbá

O regime hidrológico da área estudada foi analisado pelos valores de média diária, visto que esse tipo de dado não mascara os picos de vazão máxima e mínima

(Figura 29). Dois períodos bem definidos podem ser visualizados no hidrograma abaixo: o período de cheia, que ocorre por volta dos meses de maio a junho, podendo em alguns anos ser antecipado para os meses de março-abril; e o período de seca, normalmente compreendido entre os meses de novembro e fevereiro. Os demais meses abrangem, de maneira geral, os períodos em que o sistema ou está enchendo ou está secando. É importante destacar que nesta região do Pantanal, o período de cheia ocorre em defasagem com o período chuvoso em toda a BAP (ASSINE et al., 2015b).

É ainda possível perceber que neste hidrograma existe pequena defasagem entre as vazões máximas das estações São Francisco e Porto da Manga (aproximadamente um mês). Essa defasagem é provocada pelo retardamento do escoamento existente em todo o Pantanal, o qual é chamado por muitos autores de onda de cheia ou pulso de cheia (JUNK et al., 1989). Contudo, o pulso de cheia do Pantanal é distinto do conceito de pulso de cheia desenvolvido como modelo para os grandes rios da Amazônia, no qual trocas ocorrem entre o rio e sua planície de inundação. Nas planícies amazônicas, o rio é ativo e a planície de inundação recebe e retorna a água passivamente. No Pantanal, o rio eventualmente perde água para planície e a água não retorna para o canal no mesmo trecho do rio por quilômetros a jusante.

**Figura 29** - Hidrogramas das médias diárias das três estações fluviométricas na área.



Fonte: Dados ANA-hidroweb.

Na estação São Francisco, os picos de cheia seguem uma distribuição normal e tendem a um regime mais estável (uni-modal). A estação Porto da Manga

apresenta uma distribuição das vazões um pouco parecida com a estação São Francisco, sendo que, em alguns anos pode haver um pico de cheia bimodal (2005). Ademais, Porto da Manga situa-se em uma altura em que o rio Paraguai recebe tanto as águas do flanco leste da BAP, como as águas do norte da bacia, e isso causa algumas perturbações em sua descarga líquida (períodos de ascensão e descida das vazões).

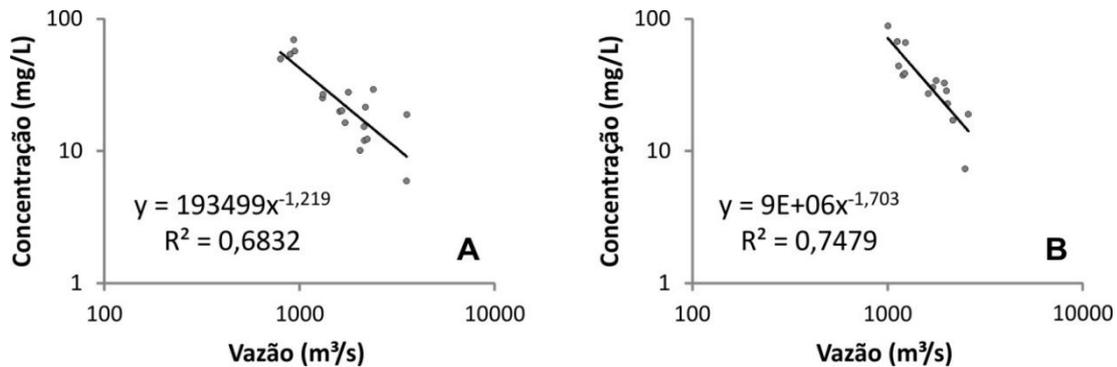
Enquanto São Francisco possui as maiores vazões máximas anuais e, em alguns anos, as menores vazões mínimas anuais, Porto da Manga possui as maiores vazões mínimas anuais e, mesmo não possuindo as maiores vazões máximas, possui a maior vazão média anual.

Das três estações presentes na área, a estação Ladário é a que mais chama atenção por causa de sua hidrógrafa peculiar. Essa estação apresenta a menor descarga média anual e a diferença entre a mínima e máxima não ultrapassa os 375 m<sup>3</sup>/s. A vazão máxima alcançada na estação Ladário dentro da série histórica foi de apenas  $\approx 1.196$  m<sup>3</sup>/s, a qual representa o ápice da relação cota-vazão de Ladário (Figura 28B). Esse valor destoa muito dos valores das outras duas estações, que possuem vazão máxima de  $\approx 3.433$  m<sup>3</sup>/s (São Francisco) e  $\approx 2.963$  m<sup>3</sup>/s (Porto da Manga). As baixas vazões registradas na estação Ladário podem ser explicadas pela perda de água do canal para a bacia de inundação em períodos de cheia, mas não em períodos em que o rio está abaixo das margens plenas. Mesmo em anos em que o rio Paraguai não atingiu vazões de margens plenas (e.g. 2001, 2005 e 2009), as vazões na estação Ladário ainda são muito menores do que as demais estações. Esse fato aponta para o efeito remanso indicado anteriormente. Portanto, além da água perdida para a planície, o rio Paraguai na estação Ladário tem sua vazão diminuída pela frenagem de suas águas, causada pelo remanso presente neste trecho.

Com base em registros de monitoramento de sedimento suspenso realizados pela ANA, relação entre concentração de sedimento e vazão foi determinada para as estações São Francisco e Porto da Manga (Figura 30). As curvas foram ajustadas a uma função potencial e apresentaram índices de correlação aceitáveis, porém, a inclinação das curvas apresentou valor negativo, indicando que a concentração de sedimento suspenso diminui com o aumento da vazão. Esse é um comportamento sedimentológico (incomum para bacias planálticas) que pode ser explicado pelo fato

de a grande maioria dos sedimentos produzidos nas áreas planálticas ser depositada nos megaleques fluviais, principalmente nos do rio São Lourenço e Taquari (ASSINE et al, 2015a). Portanto, o sistema PFPC mostra-se mais uma vez diferente dos modelos já erigidos na literatura (e.g. LEOPOLD; MADDOCK, 1953), que em sua maioria foram elaborados em contexto de bacias tributárias com predomínio de processos erosivos.

**Figura 30** - Relação sedimento-vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) São Francisco; B) Porto da Manga

Com base na relação sedimento-vazão, o cálculo de descarga sólida suspensa foi realizado nas duas estações fluviométricas da ANA (Tabela 7). Os valores dessa descarga sólida mostram que parte do sedimento fino carregado pelo rio Paraguai é depositado em sua bacia de inundação. Em anos mais úmidos, em que o rio Paraguai ultrapassa a cota de margens plenas, parte do sedimento suspenso é transferido para a bacia de inundação, onde é depositado.

O ano de 1997 exemplifica bem esse processo, em que 1.165.061 toneladas de sedimento suspenso passaram pela estação São Francisco e apenas 198.694 toneladas a mais passaram na seção Porto da Manga. Se comparado com o ano de 2009, em que o rio Paraguai não atingiu a cota de margens plenas em São Francisco, o ano de 1997 teve muito menos sedimento escoado na seção Porto da Manga, que em 2009 escoou 599.082 toneladas a mais que na seção São Francisco. Essa diferença entre anos secos e úmidos mostra que uma quantidade expressiva de sedimento suspenso é transferida para a bacia de inundação e que este não retorna para o rio Paraguai.

Embora forneçam informações relevantes com relação ao balanço sedimentar do sistema, esses dados não permitem o cálculo da quantidade de sedimento que é

transferido para a bacia de inundação, pois o rio Paraguai na estação Porto da Manga não recebe apenas as águas vindas do norte da bacia, mas também as águas oriundas do Leste, sendo o rio Taquari o principal tributário.

**Tabela 7** - Descargas (líquida e sólida suspensa) das estações São Francisco e Porto da Manga.

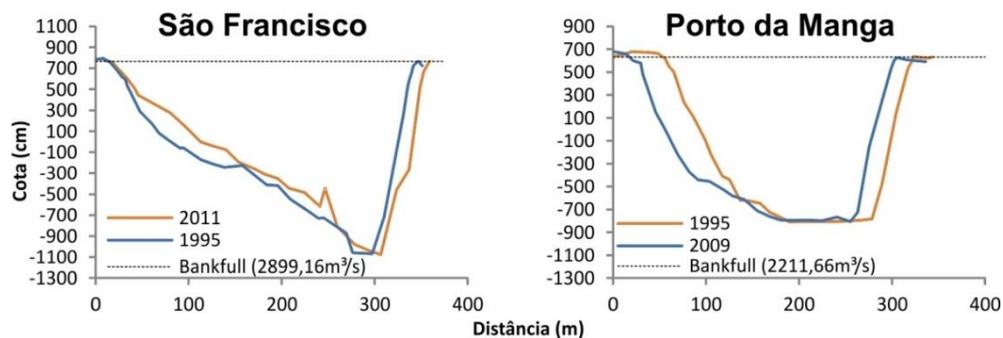
Estação	Ano	Descarga Líquida (km <sup>3</sup> /ano)	Descarga Sólida (t/ano)	Concentração média anual (mg/L)
São Francisco	1996	56,316	1.192.743	23,87
São Francisco	1997	64,305	1.165.061	21,49
São Francisco	1998	51,054	1.210.636	25,34
São Francisco	1999	52,244	1.212.807	26,38
São Francisco	2000	46,317	1.247.380	30,83
São Francisco	2001	39,415	1.279.013	34,22
São Francisco	2002	47,556	1.116.195	27,15
São Francisco	2003	52,626	1.219.503	27,86
São Francisco	2004	47,731	1.231.954	28,18
São Francisco	2005	41,900	1.264.489	32,32
São Francisco	2006	59,361	1.180.800	22,72
São Francisco	2007	54,811	1.205.960	26,07
São Francisco	2008	55,488	1.204.793	25,99
São Francisco	2009	40,616	1.270.356	32,91
Porto da Manga	1996	58,152	1.484.413	27,02
Porto da Manga	1997	66,986	1.363.755	22,54
Porto da Manga	1998	57,639	1.470.131	25,95
Porto da Manga	1999	54,444	1.583.037	32,55
Porto da Manga	2000	51,062	1.665.527	36,90
Porto da Manga	2001			
Porto da Manga	2002	56,457	1.571.619	32,76
Porto da Manga	2003	54,659	1.586.292	32,85
Porto da Manga	2004	49,636	1.648.358	34,58
Porto da Manga	2005	43,604	1.811.254	43,79
Porto da Manga	2006	59,475	1.469.668	26,72
Porto da Manga	2007	57,360	1.548.644	31,63
Porto da Manga	2008	59,330	1.514.229	29,84
Porto da Manga	2009	40,716	1.869.438	46,31

Fonte: Elaborado pelo autor. Campos em branco devido a lacunas nos registros de cota do rio Paraguai.

Uma forma de se estimar a quantidade de sedimento transferido para a bacia de inundação do rio Paraguai seria a partir da análise da vazão de margens plenas. Por meio da análise da seção transversal de cada estação fluviométrica, é possível determinar a cota de margens plenas e, conseqüentemente, a vazão correspondente a essa cota. Assim sendo, dados do perfil transversal das estações São Francisco e Porto da Manga foram obtidos no Hidroweb-ANA e com essa informação foi possível

determinar a vazão de margens plenas dessas duas estações (Figura 31). A cota de margens plenas na estação São Francisco foi determinada como igual a 765 cm e em Porto da Manga igual a 631 cm. Essas cotas correspondem às vazões de 2.899,16 m<sup>3</sup>/s e 2.211,66 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

**Figura 31** - Perfis transversais das estações São Francisco e Porto da Manga.



Fonte: Dados Hidroweb ANA.

Com as vazões de margens plenas e as hidrógrafas de cada estação fluviométrica, foi possível determinar em quais anos houve transbordamento de água em cada estação. Esses anos foram selecionados para realização do cálculo da quantidade de sedimento que foi transferido para a bacia de inundação em cada estação fluviométrica (Tabela 8). A hidrógrafa de cada um desses anos foi construída e a área acima da vazão de margens plenas foi calculada (Figura 32), a qual corresponde à quantidade de água que extravasou para a bacia de inundação.

Com a concentração de sedimento calculada pela relação sedimento-vazão (Figura 30 [p.102]), a quantidade de sedimento suspenso transferida para a planície do rio Paraguai foi calculada. Nota-se que apesar de haver uma relação inversa entre concentração de sedimento e vazão líquida, em que quanto maior a vazão, menor será a quantidade de sedimento transportado, os anos de maior vazão são os que mais transferem sedimento para a bacia de inundação (Tabela 8), pois o montante total de sedimento transferido também é função da quantidade de água.

A estação Porto da Manga possui volumes de extravasamento maiores que a estação São Francisco, pois tem vazão de margens plenas bem menor que a estação a montante, devido ao fato de seu canal ser mais raso ( $\approx 3,93$  metros menos profundo que São Francisco).

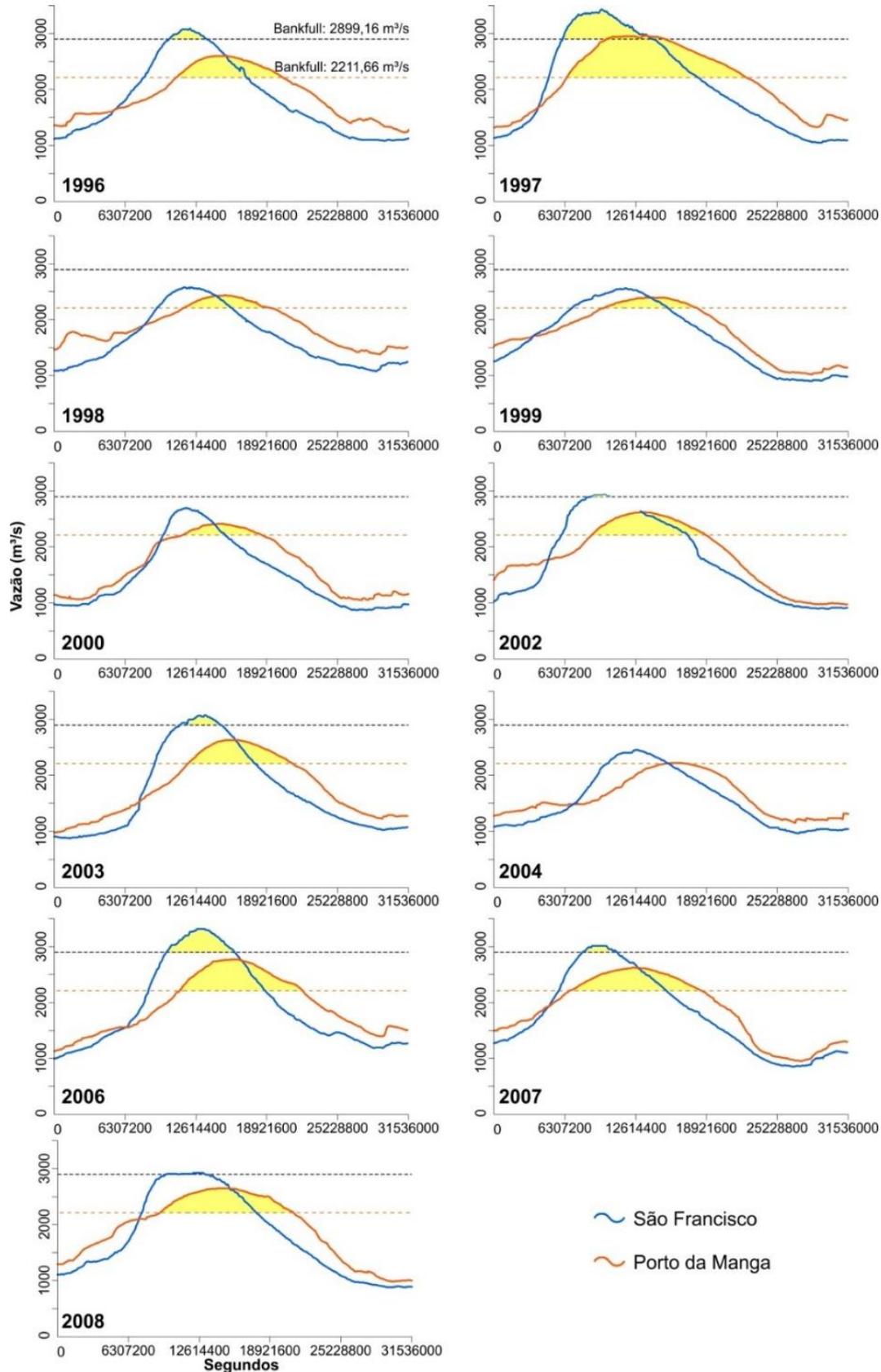
**Tabela 8** - Quantidade de água e sedimento suspenso transferidos para a bacia de inundação do rio Paraguai.

Estação	Ano	Água transferida para planície (litros)	Concentração média (mg/L)	Sedimento transferido (t)
São Francisco	1996	$3,68485 \times 10^{11}$	11,09	4.086,70
São Francisco	1997	$2,46273 \times 10^{12}$	10,25	25.247,87
São Francisco	2002	$3,38844 \times 10^{10}$	11,60	393,16
São Francisco	2003	$3,71262 \times 10^{11}$	11,14	4.137,22
São Francisco	2006	$1,52334 \times 10^{12}$	10,48	15.965,65
São Francisco	2007	$2,4575 \times 10^{11}$	11,23	2.759,40
São Francisco	2008	$4,60777 \times 10^{10}$	11,54	531,70
Porto da Manga	1996	$2,42211 \times 10^{12}$	15,40	37.306,81
Porto da Manga	1997	$7,83398 \times 10^{12}$	13,21	103.498,20
Porto da Manga	1998	$1,06216 \times 10^{12}$	16,75	17.787,55
Porto da Manga	1999	$1,02515 \times 10^{12}$	16,92	17.346,98
Porto da Manga	2000	$9,30086 \times 10^{11}$	16,83	15.653,73
Porto da Manga	2002	$2,71399 \times 10^{12}$	15,28	41.476,55
Porto da Manga	2003	$2,53991 \times 10^{12}$	15,22	38.657,39
Porto da Manga	2004	$1,34454 \times 10^{10}$	18,42	247,70
Porto da Manga	2006	$3,82972 \times 10^{12}$	14,45	55.334,27
Porto da Manga	2007	$3,01978 \times 10^{12}$	15,38	46.443,59
Porto da Manga	2008	$3,50751 \times 10^{12}$	14,97	52.513,05

Fonte: Elaborado pelo autor

Como o rio Paraguai é mais raso na estação Porto da Manga, com 14,40 metros de profundidade máxima no estágio de *bankfull*, o rio transborda com mais frequência do que em São Francisco, que possui 18,33 metros de profundidade máxima. Dos quatorze anos da série histórica analisada, o rio Paraguai em Porto da Manga ultrapassou as margens plenas em onze anos dessa série. Mais de 2 trilhões de litros de água transbordaram em média na estação Porto da Manga, carregando consigo uma média de 15,71 mg/L de sedimento suspenso. Esses valores mostram que o rio Paraguai, nessa seção, transferiu um total de mais de 426 mil toneladas de sedimento para a bacia de inundação, nos onze anos que transbordou. Em contrapartida, na estação São Francisco esses valores são bem menores, uma vez que o rio Paraguai transferiu para sua planície mais de 53 mil toneladas de sedimentos nos sete anos em que transbordou.

**Figura 32** - Extravasamento de água da calha do rio Paraguai para a bacia de inundação.



Fonte: Elaborado pelo autor. A área em amarelo corresponde ao volume de água que foi transferida para a bacia de inundação.

Esses dados mostram que o preenchimento do sistema ocorre de jusante para montante, o que estaria em consonância com os parâmetros morfométricos (sinuosidade e declividade) reconhecidos nos cinco trechos do rio Paraguai na área estudada (Tabela 2 [p.55]). Em consequência da menor declividade presente no trecho mais a jusante do rio Paraguai, o canal tem sua capacidade de transporte reduzida e a carga de leito é depositada, tornando o rio mais raso. Com um canal mais raso, os transbordamentos e, conseqüentemente, a transferência de sedimento, se tornam mais frequentes na porção inferior do sistema. Com maior aporte sedimentar nesta região do sistema, o rio Paraguai tem a declividade reduzida e, por conseguinte, menor sinuosidade.

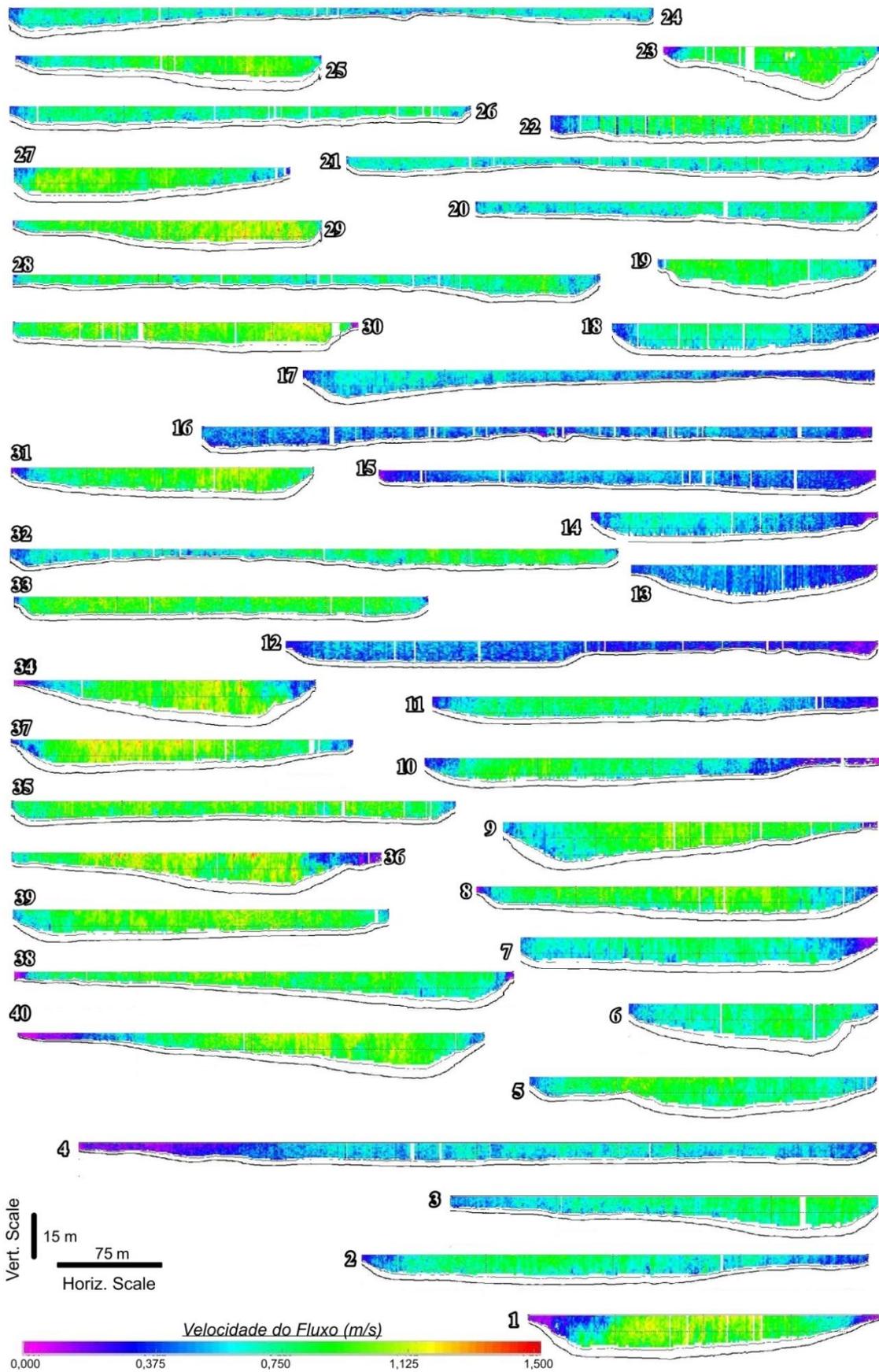
### *7.2.2. Transporte de sedimento no canal e balanço hidrossedimentar*

Neste momento, o foco das análises volta-se para os dados de medidas de velocidade de fluxo, geometria do canal (largura e profundidade), parâmetros hidráulicos (Reynolds e Froude) e características sedimentares (carga suspensa, dissolvida e de leito).

As seções levantadas em campo mostram que a geometria do canal e a velocidade de fluxo (conseqüentemente a vazão) do rio Paraguai sofrem constantes ajustes ao longo do canal, dependendo do período hidrológico analisado (Figura 33 [p.108] e Figura 34 [p.112]). Os parâmetros hidráulicos mostram que o rio Paraguai e seus afluentes apresentam fluxo turbulento tranquilo ou subcrítico, tanto na cheia como na seca (Tabela 9 [p.109] e Tabela 10 [p.113]). Apesar de sutil, existe ainda uma pequena diferença no regime de fluxo do rio Paraguai do período de cheia para a seca, em que o número de Froude aumenta um pouco, indicando um fluxo um pouco menos tranquilo, mas ainda no regime subcrítico. Essa mudança se dá principalmente nos trechos baixo e médio do rio Paraguai e parece ser causada principalmente pela diminuição da profundidade do canal nos trechos mais a jusante do rio.

Característica marcante no rio Paraguai na cheia de 2014 é o trecho entre as seções 12 e 18, em que as velocidades de fluxo diminuem consideravelmente (Figura 33). A diminuição da velocidade nesse trecho é abrupta e se mostra provocada por algo além da perda de água do canal para a planície.

**Figura 33** - Seções ADCP levantadas em agosto de 2014 (cheia) no rio Paraguai.



Fonte: Elaborado pelo autor. Trecho entre as estações fluviométricas São Francisco (40) e Porto da Manga (1). Para localização, ver Figura 26.

**Tabela 9** - Características hidráulicas das seções levantadas na cheia (agosto 2014).

Seção	Vazão (m³/s)	Veloc. média (m/s)	Larg. (m)	Prof. Média (m)	Temp. água (°C)	Reynolds	Froude
40 <sup>*</sup>	2484,81	0,775	357,9	8,84	23,6	7,92x10 <sup>9</sup>	0,083
39 <sup>**</sup>	2250,79	0,806	279,19	9,90	23,5	8,16x10 <sup>9</sup>	0,082
38	2284,52	0,748	371,16	8,09	23,7	6,43x10 <sup>9</sup>	0,084
37	2048,88	0,815	255,41	9,64	23,8	8,17x10 <sup>9</sup>	0,084
36	2018,57	0,737	274,40	9,77	23,8	7,38x10 <sup>9</sup>	0,075
35	2014,32	0,797	321,09	7,62	23,8	6,38x10 <sup>9</sup>	0,092
34	2052,98	0,798	226,23	10,40	23,8	9,29x10 <sup>9</sup>	0,079
I-1-4	2121,18	0,730	335,17	8,21	23,8	6,70x10 <sup>9</sup>	0,081
33	1963,46	0,778	307,74	8,10	24,0	6,68x10 <sup>9</sup>	0,087
32	1870,56	0,671	436,56	6,50	23,9	4,41x10 <sup>9</sup>	0,084
31	1787,28	0,800	236,27	9,31	23,8	7,97x10 <sup>9</sup>	0,084
30	1973,48	0,836	309,74	8,61	24,2	6,88x10 <sup>9</sup>	0,091
29	1770,05	0,879	250,05	8,46	24,2	7,84x10 <sup>9</sup>	0,097
28	1832,42	0,667	433,68	6,51	24,1	5,12x10 <sup>9</sup>	0,084
27	1691,56	0,778	204,46	10,39	24,1	8,28x10 <sup>9</sup>	0,077
26	1667,69	0,661	418,40	7,46	24,1	4,76x10 <sup>9</sup>	0,077
25	1627,25	0,760	241,54	8,91	24,1	6,64x10 <sup>9</sup>	0,081
24	1572,91	0,557	477,18	6,07	24,1	3,35x10 <sup>9</sup>	0,072
23	1431,67	0,708	169,35	11,41	24,2	8,47x10 <sup>9</sup>	0,067
22	1494,25	0,659	244,44	9,28	24,1	6,30x10 <sup>9</sup>	0,069
21	1454,62	0,576	421,85	6,44	24,1	3,79x10 <sup>9</sup>	0,072
20	1408,14	0,604	314,59	7,66	24,1	4,83x10 <sup>9</sup>	0,070
19	1256,83	0,707	192,79	10,04	24,1	6,87x10 <sup>9</sup>	0,071
18	1178,58	0,564	204,74	10,33	23,1	5,83x10 <sup>9</sup>	0,056
17	1259,24	0,477	408,75	6,30	23,0	2,45x10 <sup>9</sup>	0,057
16	1218,73	0,395	488,67	6,31	23,1	2,52x10 <sup>9</sup>	0,050
15	1066,80	0,395	366,29	7,20	23,2	2,94x10 <sup>9</sup>	0,047
14	961,52	0,473	259,02	9,11	22,7	3,92x10 <sup>9</sup>	0,050
13	735,01	0,391	174,64	8,50	23,1	4,07x10 <sup>9</sup>	0,043
I-2-4	1248,00	0,447	434,47	7,84	24,4	3,50x10 <sup>9</sup>	0,051
LAD <sup>†</sup>	1162,52	0,395	375,29	7,71	24,4	3,22x10 <sup>9</sup>	0,045
12	1097,30	0,347	549,59	7,07	24,4	2,15x10 <sup>9</sup>	0,042
11	1634,13	0,574	338,09	8,48	24,4	4,71x10 <sup>9</sup>	0,063
10	1632,84	0,592	330,39	7,98	24,4	5,09x10 <sup>9</sup>	0,067
9	2357,53	0,760	273,93	10,40	24,7	8,58x10 <sup>9</sup>	0,075
8	2256,49	0,747	296,00	9,66	24,6	8,09x10 <sup>9</sup>	0,077
I-4-1	2199,65	0,565	532,43	7,36	24,8	4,44x10 <sup>9</sup>	0,067
7	1882,92	0,591	275,84	11,63	24,9	7,10x10 <sup>9</sup>	0,055
6	1717,50	0,656	185,79	13,16	24,9	9,25x10 <sup>9</sup>	0,058
5	2053,97	0,715	252,82	10,84	25,0	8,41x10 <sup>9</sup>	0,069
4	2025,00	0,462	597,54	7,50	25,0	3,67x10 <sup>9</sup>	0,054
3	2065,20	0,640	323,55	9,72	25,0	6,82x10 <sup>9</sup>	0,066

Fonte: Elaborado pelo autor. (°) seção realizada no local onde a ANA executa levantamento batimétrico da estação São Francisco; (\*\*) seção realizada em frente a régua São Francisco; (†) seção realizada em frente a régua de Ladário; (‡) seção realizada em frente a régua de Porto da Manga.

Tabela 9 - continuação

Seção	Vazão (m³/s)	Veloc. média (m/s)	Larg. (m)	Prof. Média (m)	Temp. água (°C)	Reynolds	Froude
2	2014,70	0,606	392,42	8,80	25,0	$5,69 \times 10^9$	0,065
1 <sup>‡</sup>	2361,42	0,758	254,32	11,82	25,4	$9,75 \times 10^9$	0,070
PAR-2	2293,41	0,516	528,46	8,55	25,2	$4,79 \times 10^9$	0,056
PAR-1	2404,35	0,610	393,41	9,70	25,5	$6,74 \times 10^9$	0,063
MIR	53,72	0,072	120,69	6,94	26,7	$5,18 \times 10^8$	0,009
41	272,17	0,474	107,47	4,96	23,5	$2,46 \times 10^9$	0,068
42	214,10	0,253	211,40	3,89	24,5	$1,08 \times 10^9$	0,041
43	170,17	0,186	336,46	4,22	23,9	$7,79 \times 10^8$	0,029
44	350,99	0,271	295,20	4,58	26,6	$1,35 \times 10^9$	0,040
45	551,10	0,369	231,00	6,69	25,0	$2,59 \times 10^9$	0,046
46	264,91	0,258	180,04	5,80	25,6	$1,57 \times 10^9$	0,034
47	322,27	0,416	134,35	6,51	24,9	$2,69 \times 10^9$	0,052

Ao observar as vazões ao longo do rio Paraguai, desde a estação São Francisco até Ladário, percebeu-se que perda de água para a planície ocorre nesse trecho. No entanto, o trecho entre as seções 18 e 12 parece estar influenciado pelo efeito remanso existente no rio Paraguai (diminuição abrupta da velocidade de fluxo – Figura 33) e esta perda pode não ser tão grande como os valores de vazão mostram.

No trecho entre as seções 40 e 19, o rio Paraguai perdeu um total de 1.227,98 m³/s de água para a bacia de inundação (Tabela 9). Esse mesmo cálculo não pode ser aplicado para o trecho entre as seções 18 e 12, devido ao efeito remanso reconhecido nesse trecho.

Em contrapartida, o rio Paraguai ganhou 1.104,59 m³/s no trecho entre as seções 19 e 1. Esses valores mostram que o rio Paraguai perdeu 123,39 m³/s ao longo da estação São Francisco até Porto da Manga. No trecho entre as seções 11 e 1 o rio Paraguai ganhou 1.264,12 m³/s, vazão referente a seus afluentes nesse trecho (rios Bracinho, Belenzinho, Paraguai-Mirim, e antiga foz do Taquari). Todavia, dentro desse trecho existem trechos em que o rio Paraguai perde água para a planície, como o trecho entre as seções 8 e 2, em que o canal perdeu 342,83 m³/s.

O trecho entre a seção 9 e a foz do rio Miranda é um trecho de difícil contabilização da quantidade de água perdida para a planície, visto que nessa região o rio Paraguai recebe água, tanto de seus afluentes, como do fluxo em lençol vindo do leque do rio Taquari. Na realidade, todo o trecho desde a seção 19 até a

foz do rio Miranda é difícil de contabilizar a quantidade de água que deixa o canal, uma vez que nesse trecho do rio Paraguai, as águas que extravasaram no trecho acima retornam para o canal nos trechos abaixo.

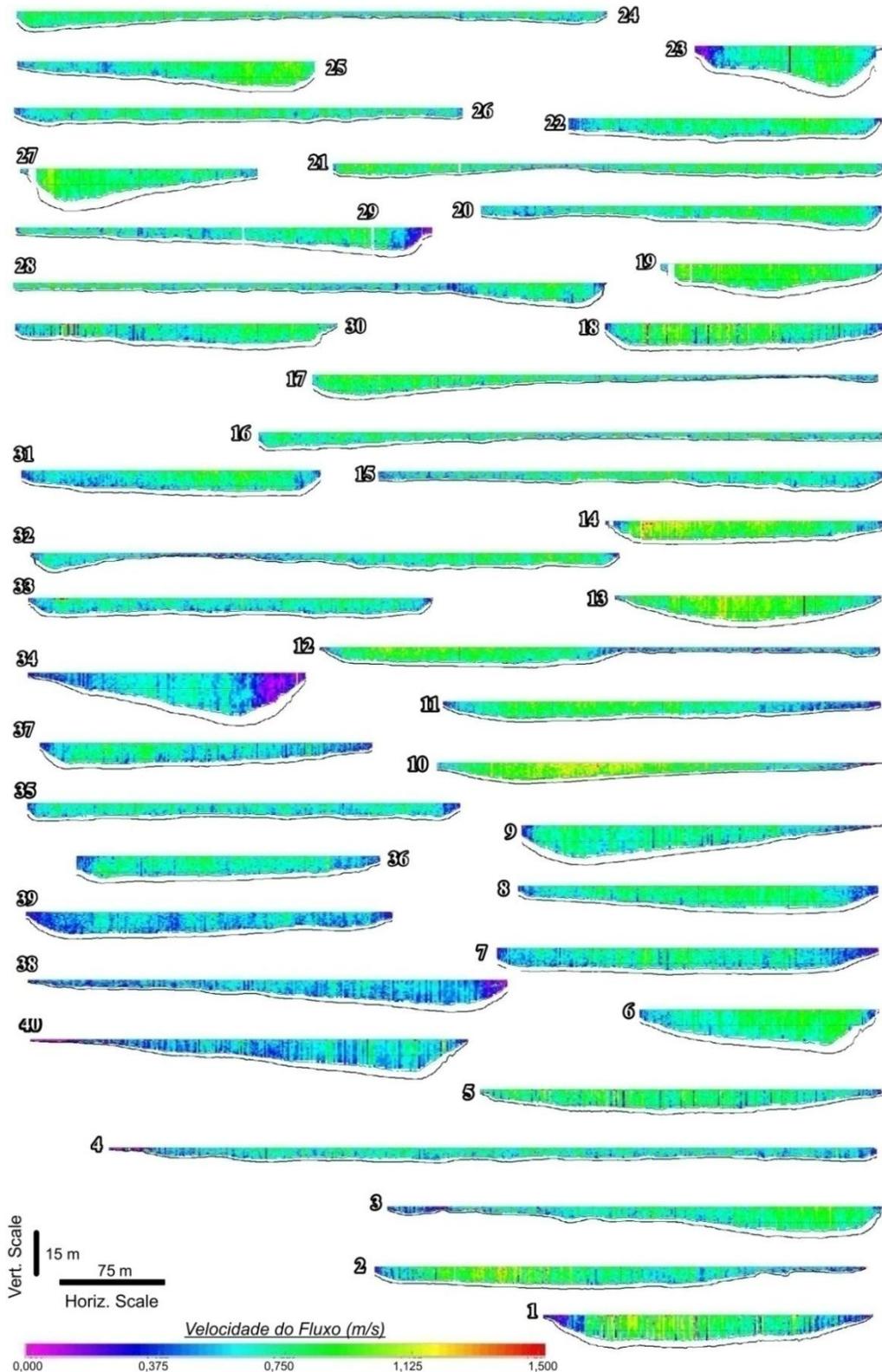
No período de seca, o rio Paraguai sofre ajustes em sua dinâmica hidráulica e sedimentar. Trechos que na cheia possuíam as maiores velocidades médias, como da seção 40 a 34 (0,782 m/s), na seca, passam a ter as menores velocidades (0,507 m/s - Figura 34 e Tabela 10). E trechos que possuíam as menores velocidades médias, como o trecho entre as seções 18 e 12 (0,428 m/s), passam a ter velocidade bem maior (0,655 m/s). Esse aumento da velocidade de fluxo no trecho médio do rio Paraguai na seca mostra que o efeito remanso tem sua maior intensidade neste trecho. O trecho superior parece não ser afetado pelo remanso, já que a velocidade de fluxo diminui na seca, como é esperado para um trecho de rio em condições normais (sem remanso).

Os afluentes do rio Paraguai também sofrem mudanças no comportamento hidrológico. Na cheia, todos os afluentes, inclusive aqueles que são considerados baías pela denominação local (Castelo e Tuiuiú), contribuem positivamente para a descarga líquida do rio Paraguai (Tabela 9). Exceção a essa regra é o rio Paraguai-Mirim (seção 41), que nasce na margem esquerda do rio Paraguai na altura entre as seções 40 e 39, e que contribui negativamente para a vazão desse rio, por ser um braço do Paraguai. Na seca, esses afluentes passam a não contribuir significativamente com a vazão do rio Paraguai, que tem sua vazão aumentada a jusante, devido, principalmente, à contribuição de afluentes mais perenes como o Paraguai-Mirim (seção 47), canal do Tamengo, Taquari (antiga foz), Abobral e Miranda.

Essas mudanças no comportamento hidrológico do rio Paraguai, entre a cheia e a seca, provocam mudanças na dinâmica hidrossedimentar do rio na área estudada. Do ponto de vista estritamente hídrico, o sistema canal-planície passa a contar com um aporte de água bem menor à medida que o rio vai secando, e isso passa a influir na biota da região, que se vê cada vez mais dominada por espécies de vegetação terrestre. Essa dinâmica de cheia e seca no Pantanal é bem conhecida por provocar mudanças nos parâmetros físico-químicos das águas do rio Paraguai e, como consequência, a morte de peixes (CALHEIROS et al., 1991; CALHEIROS; HAMILTON, 1998; MACEDO et al., 2015). Ainda assim, poucos são os

trabalhos que quantificam essa troca de água entre canal e planície no Pantanal (e.g. PAZ et al., 2010; PAZ et al., 2014).

**Figura 34** - Seções ADCP levantadas em novembro de 2015 (seca) no rio Paraguai.



Fonte: Elaborado pelo autor. Trecho entre as estações fluviométricas São Francisco (40) e Porto da Manga (1). Para localização, ver Figura 26.

**Tabela 10** - Características hidráulicas das seções levantadas na seca (novembro de 2015).

Seção	Vazão (m³/s)	Veloc. média (m/s)	Larg. (m)	Prof. Média (m)	Temp. água (°C)	Reynolds	Froude
40 <sup>**</sup>	1090,77	0,452	317,73	6,66	28,2	3,68x10 <sup>9</sup>	0,056
39 <sup>*</sup>	1080,13	0,486	270,46	8,03	28,4	4,57x10 <sup>9</sup>	0,055
38	1067,94	0,451	360,36	6,66	28,4	3,38x10 <sup>9</sup>	0,056
37	1084,34	0,562	274,10	7,69	28,6	4,97x10 <sup>9</sup>	0,065
36	1116,29	0,587	226,24	8,37	28,6	5,63x10 <sup>9</sup>	0,065
35	1120,06	0,585	329,16	6,05	28,7	4,01x10 <sup>9</sup>	0,076
34	1063,69	0,429	221,52	10,91	28,8	5,42x10 <sup>9</sup>	0,041
I-1-4	1163,84	0,545	322,70	6,53	29,0	4,22x10 <sup>9</sup>	0,068
33	1175,93	0,597	300,47	6,58	29,1	4,59x10 <sup>9</sup>	0,074
32	1171,64	0,614	451,03	4,51	29,0	3,18x10 <sup>9</sup>	0,092
31	1141,24	0,603	229,31	8,36	29,0	5,75x10 <sup>9</sup>	0,067
30	1157,03	0,636	237,67	7,55	32,2	5,98x10 <sup>9</sup>	0,074
29	1173,59	0,588	332,61	6,38	32,2	5,18x10 <sup>9</sup>	0,074
28	1172,48	0,605	437,90	4,73	32,5	3,31x10 <sup>9</sup>	0,089
27	1196,28	0,700	191,69	9,06	32,5	7,95x10 <sup>9</sup>	0,074
26	1148,05	0,659	328,93	5,38	32,6	4,35x10 <sup>9</sup>	0,091
25	1164,08	0,675	222,23	7,73	32,7	6,48x10 <sup>9</sup>	0,078
24	1163,41	0,664	438,14	4,10	32,7	3,38x10 <sup>9</sup>	0,105
23	1131,42	0,618	143,51	12,93	32,7	8,83x10 <sup>9</sup>	0,055
22	1172,76	0,646	241,60	7,63	32,7	6,11x10 <sup>9</sup>	0,075
21	1160,27	0,660	413,20	4,44	32,7	3,61x10 <sup>9</sup>	0,100
20	1162,22	0,649	302,26	6,16	32,7	4,82x10 <sup>9</sup>	0,084
19	1179,78	0,765	167,12	8,86	32,7	8,63x10 <sup>9</sup>	0,082
18	1168,08	0,636	220,43	8,62	32,7	6,72x10 <sup>9</sup>	0,069
17	1154,98	0,668	415,28	4,58	32,7	2,48x10 <sup>9</sup>	0,100
16	1165,55	0,643	495,90	4,02	32,6	3,33x10 <sup>9</sup>	0,103
15	1157,49	0,622	383,84	5,08	32,6	3,85x10 <sup>9</sup>	0,088
14	1185,31	0,794	223,59	7,16	32,6	6,87x10 <sup>9</sup>	0,095
13	1165,65	0,719	201,89	8,10	32,5	7,17x10 <sup>9</sup>	0,081
I-2-4	1269,20	0,656	372,12	5,41	28,5	3,97x10 <sup>9</sup>	0,090
LAD <sup>†</sup>	1222,81	0,643	368,90	5,16	28,4	3,82x10 <sup>9</sup>	0,090
I-3-4	1232,87	0,549	423,29	5,32	28,5	3,47x10 <sup>9</sup>	0,076
12	1250,77	0,654	418,67	4,67	28,5	3,47x10 <sup>9</sup>	0,097
11	1264,98	0,646	355,06	5,96	28,6	4,25x10 <sup>9</sup>	0,085
10	1291,09	0,806	338,68	4,78	28,5	4,43x10 <sup>9</sup>	0,118
9	1443,67	0,619	287,64	8,34	28,5	5,81x10 <sup>9</sup>	0,068
8	1453,62	0,642	285,72	8,16	28,5	5,88x10 <sup>9</sup>	0,072
I-4-1	1434,93	0,605	533,08	4,59	28,2	3,10x10 <sup>9</sup>	0,090
7	1427,26	0,560	294,81	8,70	29,1	5,64x10 <sup>9</sup>	0,061
6	1448,28	0,678	180,49	11,07	29,1	8,96x10 <sup>9</sup>	0,065
5	1428,38	0,671	303,95	7,12	29,1	5,48x10 <sup>9</sup>	0,080

Fonte: Elaborado pelo autor. (°) seção realizada no local onde a ANA executa levantamento batimétrico da estação São Francisco; (\*\*) seção realizada em frente a régua São Francisco; (†) seção realizada em frente a régua de Ladário; (‡) seção realizada em frente a régua de Porto da Manga; (⊙) Seção não foi realizada devido presença de camalotes.

Tabela 10 - continuação

Seção	Vazão (m³/s)	Veloc. média (m/s)	Larg. (m)	Prof. Média (m)	Temp. água (°C)	Reynolds	Froude
4	1475,32	0,566	575,33	4,61	29,1	$3,01 \times 10^9$	0,084
3	1455,56	0,625	363,15	6,51	29,1	$4,63 \times 10^9$	0,078
2	1464,26	0,669	372,17	6,03	29,1	$4,62 \times 10^9$	0,087
1 <sup>‡</sup>	1525,11	0,679	247,54	8,83	28,8	$7,15 \times 10^9$	0,073
PAR-2	1502,66	0,541	502,40	5,51	28,6	$3,46 \times 10^9$	0,074
PAR-1	1740,63	0,708	391,94	6,12	29,0	$5,35 \times 10^9$	0,091
MIR	214,79	0,651	99,66	3,65	28,4	$2,44 \times 10^9$	0,109
41	4,94	0,016	100,62	3,34	28,8	$5,54 \times 10^7$	0,003
42	12,70	0,034	177,04	2,04	32,0	$8,84 \times 10^7$	0,008
43	9,46	0,021	218,35	2,16	33,6	$5,51 \times 10^7$	0,005
44 <sup>☆</sup>							
45	1,64	0,002	211,15	4,11	29,0	$9,83 \times 10^6$	0,000
46	-2,66	0,005	202,84	2,71	28,0	$1,52 \times 10^7$	0,001
47	153,13	0,350	121,18	4,14	27,7	$1,47 \times 10^9$	0,055

Feito o exame do balanço hidráulico, o passo seguinte foi a análise das características sedimentares do rio Paraguai no trecho estudado. As características sedimentares e os valores de descarga sólida de cada seção levantada estão discriminados nas Tabela 11 [p.115] e Tabela 12 [p.117]. As concentrações de sedimento suspenso apresentaram valores condizentes com o esperado pelo modelo da Figura 30 [p.102], em que as concentrações na cheia são menores que as concentrações na seca.

A concentração de sedimento dissolvido nas seções mais próximas do embasamento (seções 44, LAD, 12, 10) é maior que nas outras seções, pelo fato de existir rochas carbonáticas (Formação Tamengo e Xaraiés) nos relevos residuais da área.

O trecho entre as seções 40 e 19, que transfere 106 bilhões de litros d'água por dia, transferiu 278,73 t/dia de sedimento suspenso para a bacia de inundação e 2.113,49 t/dia de sedimento dissolvido (Tabela 13 [p.122]).

Tabela 11 - Características sedimentares das seções levantadas em campo (Agosto de 2014).

Seção	Css <sup>1</sup> (mg/L)	Csd <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
40	1,83	14	0,2036	0,3656	392,878	3005,626	436,561	3835,065
39	2,00	14	0,2045	0,3708	388,937	2722,556	423,368	3534,861
38	2,00	14	0,2201	0,3865	394,938	2763,355	424,656	3582,949
37	2,67	14	0,2154	0,3713	472,652	2478,325	422,101	3373,078
36	1,17	13	0,3109	0,4962	204,053	2267,258	325,130	2796,441
35	1,33	14	0,2515	0,3943	231,470	2436,521	559,214	3227,205
34	2,83	14	0,2904	0,3940	501,978	2483,285	342,970	3328,233
I-1-4	1,42	14	0,1940	0,3613	259,327	2565,779	307,372	3132,478
33	1,33	13	0,1727	0,2078	225,625	2205,358	312,342	2743,325
32	2,17	14	0,1667	0,2045	350,708	2262,629	216,006	2829,343
31	2,17	14	0,1797	0,2604	335,094	2161,894	289,052	2786,040
30	2,00	14	0,2709	0,3896	341,017	2387,121	702,772	3430,910
29	1,00	14	Fundo lamoso		152,932	2141,052	0,000	2293,984
28	1,83	14	0,1643	0,2086	289,728	2216,495	194,635	2700,858
27	2,00	14	0,1706	0,2051	292,302	2046,111	187,444	2525,857
26	2,67	14	0,1718	0,2044	384,716	2017,238	183,130	2585,084
25	2,83	13	0,1792	0,2593	397,882	1827,727	239,888	2465,497
24	2,33	14	0,1289	0,1736	316,646	1902,592	50,880	2270,118
23	2,00	14	0,2837	0,4002	247,393	1731,748	129,723	2108,864
22	1,67	15	0,1867	0,3262	215,602	1936,548	116,544	2268,694
21 <sup>†</sup>	1,83	14	0,1447	0,1997	229,993	1759,508	66,279	2055,780
20	1,50	14	0,1909	0,3488	182,495	1703,286	100,323	1986,104
19	0,67	14	0,2357	0,3777	72,755	1520,262	153,506	1746,523
18	2,67	14	0,1776	0,2216	271,884	1425,610	25,938	1723,432
17	1,33	13	0,1407	0,1966	144,702	1414,378	7,505	1566,585
16	1,33	15	0,1597	0,2038	140,047	1579,474	1,757	1721,278
15	0,67	14	0,1583	0,2101	61,755	1290,401	1,087	1353,243
14	1,33	13	0,1556	0,2000	110,490	1079,979	8,130	1198,599
13	1,50	14	0,1762	0,2103	95,257	889,068	0,097	984,422
I-2-4	1,33	14	0,1701	0,2051	143,41	1509,581	8,310	1661,301
LAD	1,67	16	0,1617	0,2045	167,738	1607,068	0,995	1775,801
12 <sup>#</sup>	3,00	19	Leito rochoso		284,420	1801,328	0,000	2085,748
11	1,83	15	0,1701	0,2086	258,376	2117,832	59,324	2435,532
10 <sup>#</sup>	2,00	17	Leito rochoso		282,155	2398,315	0,000	2680,470
9	0,83	15	0,1960	0,3616	169,063	3055,359	297,166	3521,588
8	1,83	14	0,1704	0,2084	356,778	2729,45	220,314	3306,542
I-4-1	1,50	15	0,1888	0,3483	285,075	2850,746	113,542	3249,363
7	2,67	16	0,1730	0,2053	434,367	2602,949	46,293	3083,609
6	2,00	15	0,2768	0,3901	296,784	2225,880	81,882	2604,546
5	1,50	16	0,2783	0,4112	266,195	2839,408	215,303	3320,906

Fonte: Elaborado pelo autor. (†) os valores de granulometria referem-se a uma amostra arenosa, pois na margem esquerda foi recuperado material lamoso; (#) não foi recuperado amostra de fundo, somente lascas de rocha vieram no Van Veen; <sup>1</sup>Concentração de sólido suspenso; <sup>2</sup>Concentração de sólido dissolvido.

Tabela 11 - continuação

Seção	C <sub>ss</sub> <sup>1</sup> (mg/L)	C <sub>sd</sub> <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
4	2,50	15	0,1886	0,3443	437,400	2624.400	25,152	3086.952
3	1,17	15	0,1808	0,2627	208,767	2676.499	112,303	2997.569
2	1,00	14	0,1858	0,3244	174,07	2436.981	115,963	2727.014
1	2,17	14	0,1790	0,2357	442,738	2856.374	207,876	3506.988
PAR-2	0,67	13	0,1734	0,2109	132,761	2575.958	38,316	2747.035
PAR-1	1,25	15	0,1934	0,3630	259,67	3116.038	120,338	3496.046
MIR	1,83	22	0,2030	0,3648	8,810	102.115	0,000	110.925
41	2,33	14	Fundo lamoso		54,791	329.214	0,000	384.005
42	2,17	15	Fundo lamoso		40,141	277.470	0,000	317.611
43	1,17	13	Fundo lamoso		17,257	191.136	0,000	208.393
44	2,00	21	Fundo lamoso		60,651	636.836	0,000	697.487
45	1,00	14	Fundo lamoso		47,615	666.606	0,000	714.221
46	1,17	13	0,1204	0,1578	26,779	297.548	0,000	324.327
47	1,17	13	0,1808	0,2488	32,578	361.975	1,494	396.047

Esses valores de carga sólida transferidas para a planície podem servir para o cálculo da quantidade média anual transferida para a bacia de inundação. Uma vez que a vazão na estação São Francisco (2.484,81 m<sup>3</sup>/s) tem permanência de 16% (ver item 7.2.3), ou seja, é igualada ou ultrapassada nessa proporção ao longo dos anos, é possível afirmar que essa condição encontrada na cheia de 2014 ocorre, em média, em 58 dias ao ano. Portanto, pode-se afirmar que o trecho superior do rio Paraguai (entre seção 40 e 19) transfere em média 16.166,34 t/ano de sedimento suspenso e 122.582,42 t/ano de sedimento dissolvido para a bacia de inundação.

Esses valores do trecho superior do rio Paraguai estão em oposição ao que seria esperado para o trecho inferior do rio na área estudada (da seção 8 a foz do rio Miranda), posto que para o trecho inferior são calculados apenas 127,89 t/dia (7.929,18 t/ano) de sedimento suspenso e 1.007,01 t/dia (62.434,62 t/ano) de carga dissolvida.

Conforme a análise das seções transversais das estações São Francisco e Porto da Manga (item 7.2.1) seria esperado que o trecho inferior do rio Paraguai tivesse maiores quantidades de sedimento transferido, uma vez que esse trecho possui transbordamentos mais frequentes que o trecho superior. Porém, isso não se confirma aqui devido ao fato de o trecho inferior ter seu balanço hidrossedimentar perturbado pelas águas que entram no rio Paraguai pelo leque do Taquari (Figura 35

[p.119]), subestimando assim a quantidade de água transferida pelo rio Paraguai para a planície nesse trecho.

**Tabela 12** - Características sedimentares das seções levantadas em campo (Novembro de 2015).

Seção	Css <sup>1</sup> (mg/L)	Csd <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
40	21	10	0,2074	0,4038	1979,093	942,425	13,822	2935,340
39	31	10	0,1938	0,3888	2893,015	933,231	20,593	3846,839
38	18	10	0,0717	0,2915	1660,862	922,701	5,601	2583,563
37	26	10	0,1845	0,3109	2435,866	936,871	56,855	3429,592
36	14	10	0,2858	0,4459	1350,266	964,475	73,851	2388,592
35	14	10	0,2739	0,407	1354,829	967,735	122,335	2444,899
34	19	10	0,2985	0,4127	1746,147	919,025	1,937	2667,109
I-1-4	26	10	0,1806	0,2908	2614,448	1005,557	57,361	3677,366
33	22	10	0,1799	0,2621	2235,202	1016,001	92,469	3343,672
32	19	10	0,1342	0,1893	1923,364	1012,297	138,925	3074,586
31	17	10	0,1774	0,2120	1676,253	986,031	59,38	2721,664
30	18	11	0,2895	0,4537	1799,415	1099,642	151,541	3050,598
29	33	10	0,1787	0,3076	3346,143	1013,983	105,44	4465,566
28	24	11	0,1753	0,2078	2431,259	1114,327	173,218	3718,804
27	22	11	0,2629	0,3869	2273,881	1136,941	179,044	3589,866
26	20	11	0,1832	0,2968	1983,825	1091,104	235,807	3310,736
25	22	11	0,1800	0,2957	2212,676	1106,338	151,087	3470,101
24	18	10	0,3303	0,6281	1809,341	1005,190	625,604	3440,135
23	19	10	0,2191	0,3812	1857,326	977,545	55,051	2889,922
22	25	10	0,1952	0,3495	2533,162	1013,265	141,911	3688,338
21	24	11	0,1552	0,2014	2405,942	1102,723	262,671	3771,336
20	30	11	0,1728	0,3072	3012,477	1104,575	189,225	4306,277
19	25	11	0,3366	0,6964	2548,316	1121,259	369,412	4038,987
18	20	11	0,1441	0,1974	2018,439	1110,141	80,34	3208,920
17	21	10	0,1816	0,3126	2095,596	997,903	441,196	3534,695
16	30	11	0,1435	0,1976	3021,098	1107,736	272,354	4401,188
15	20	11	0,1382	0,1949	2000,151	1100,083	157,666	3257,900
14	20	10	0,1638	0,2032	2048,212	1024,106	313,578	3385,896
13	25	10	0,1819	0,2459	2515,644	1007,122	174,69	3697,456
I-2-4	17	11	0,1770	0,2216	1864,195	1206,244	205,496	3275,935
LAD	21	10	0,1272	0,1573	2218,657	1056,504	115,544	3390,705
I-3-4	23	10	0,1639	0,2036	2449,967	1065,203	71,093	3586,263
12	43	11	0,1734	0,2088	4646,968	1188,734	234,747	6070,449
11	13	11	0,1737	0,2096	1420,823	1202,235	167,057	2790,115
10 <sup>#</sup>	27	23	Leito rochoso		3011,845	2565,646	0,000	5577,491
9	23	11	0,1766	0,2678	2867,663	1372,064	98,667	4338,394
8	22	11	0,1794	0,2290	2763,050	1381,525	114,642	4259,217
I-4-1	20,5	11	0,1378	0,1930	2541,541	1363,754	151,723	4057,018

Fonte: Elaborado pelo autor. (#) não foi recuperado amostra de fundo, somente lascas de rocha vieram no Van Veen.

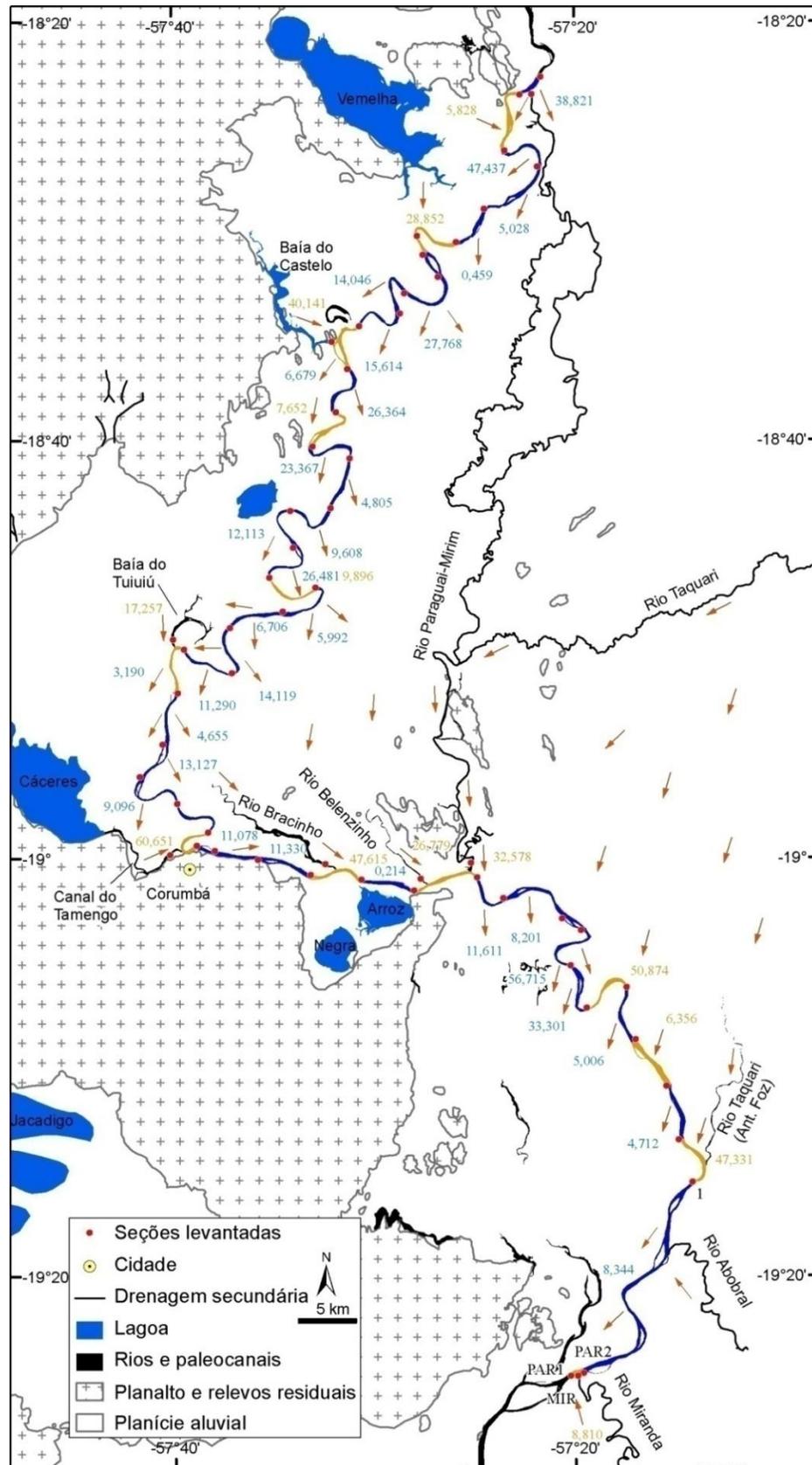
Tabela 12 - continuação

Seção	C <sub>ss</sub> <sup>1</sup> (mg/L)	C <sub>sd</sub> <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
7	18	11	0,1823	0,2785	2219,683	1356,473	52,784	3628,940
6	18	11	0,2921	0,3946	2252,364	1376,444	118,706	3747,514
5	20	11	0,2769	0,3919	2468,241	1357,532	239,767	4065,540
4	21	11	0,2020	0,3684	2676,822	1402,145	190,172	4269,139
3	23	11	0,1723	0,2079	2892,487	1383,363	175,34	4451,190
2	21	11	0,1723	0,2079	2656,753	1391,633	211,589	4259,975
1	30	11	0,1760	0,2088	3953,080	1449,463	124,36	5526,903
PAR-1	35	11	0,1624	0,2016	5263,674	1654,298	450,851	7368,823
PAR-2	18	11	0,2625	0,4330	2336,931	1428,124	76,734	3841,789
MIR	17	37	0,2705	0,4032	315,486	686,647	99,382	1101,515
41	19	10	Fundo lamoso		8,114	4,271	0,000	12,385
42	11	16	Fundo lamoso		12,073	17,561	0,000	29,634
43	4	12	Fundo lamoso		3,268	9,805	0,000	13,073
45	4	9	Fundo lamoso		0,569	1,279	0,000	1,848
46	3	9	Fundo lamoso		-0,691	-2,072	0,000	-2,763
47	6	10	0,1832	0,3037	79,381	132,301	0,165	211,847

Nota-se, portanto, as dificuldades existentes em se determinar o balanço hidrossedimentar da PFPC, em virtude da grande complexidade da dinâmica hidrológica da área. Dessa forma, estudos de modelagem numérica dos processos de troca de água entre o canal e a planície mostram-se uma boa alternativa para essa questão (e.g. [GARCIA et al., 2013a,b](#)).

Nos períodos de águas baixas não há trocas de água e sedimento entre canal e bacia de inundação (Tabela 10 [p.113] e Tabela 14 [p.125]). Na seca, os afluentes do rio Paraguai que são ativados apenas na cheia (baía do Castelo, baía do Tuiuiú, Canal do Tamengo, rio Bracinho, rio Belenzinho e antiga foz do Taquari) depositam sua carga suspensa, levando esses canais a processos de colmatação. A julgar pelos regimes de fluxo baixos (Tabela 9 [p.109]), mesmo na cheia ocorre deposição nesses canais que estão em processo de abandono.

**Figura 35** - Trocas sedimentares (carga suspensa) entre canal principal e bacia de inundação.



Fonte: Elaborado pelo autor. Trechos em azul indicam perda de água para a planície e em marrom, ganho de água. Números em t/dia de sedimento suspenso.

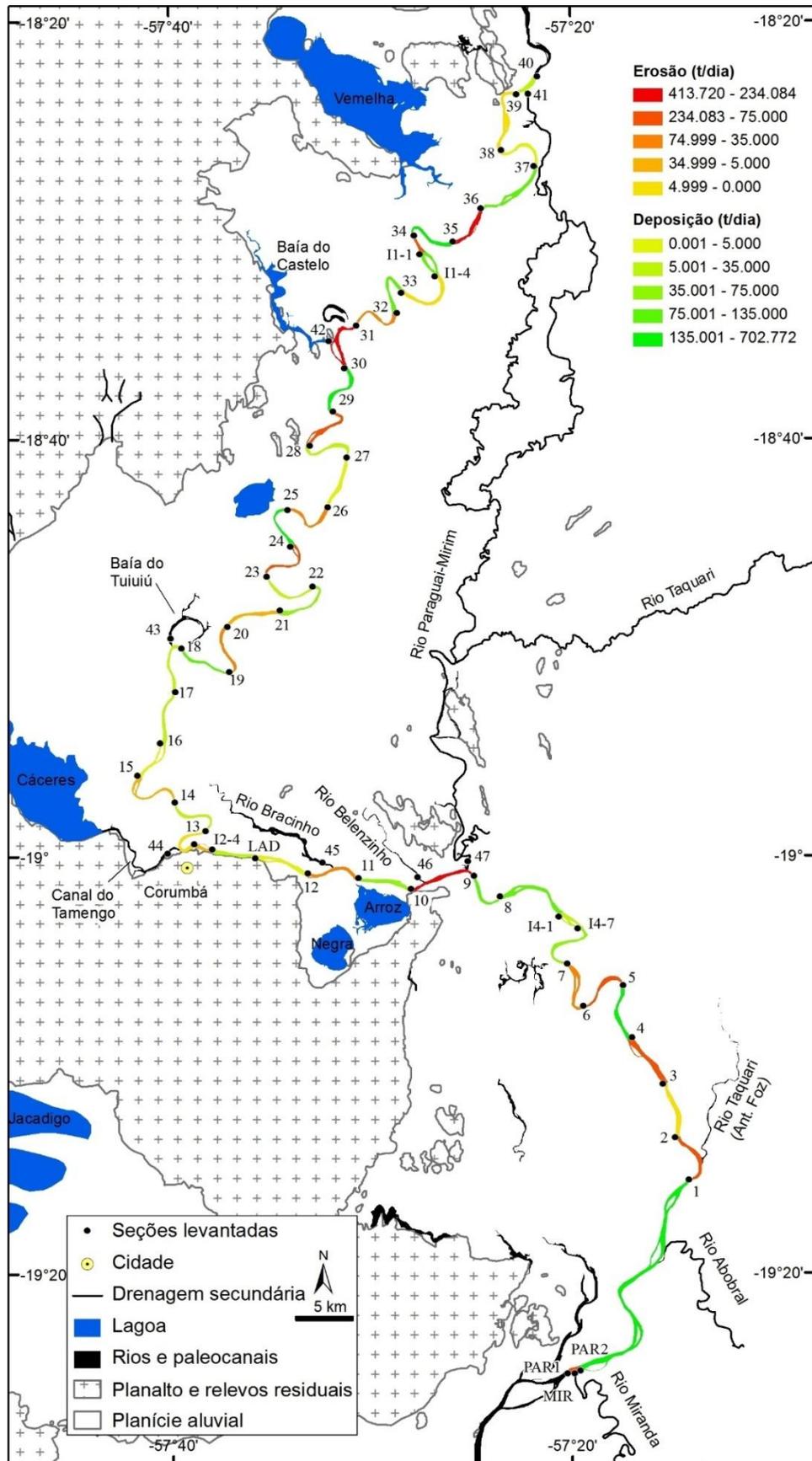
Em ambos os períodos medidos, esses canais não transportaram carga de fundo, pois apresentam fundo lamoso tanto na cheia como na seca. Apenas o rio Belenzinho (seção 46) apresentou carga de fundo um pouco arenosa, mas que não estava sendo transportada (Tabela 11 [p.115]) devido ao baixo valor de velocidade de fluxo. Essa areia deve ter sido transportada para dentro desse rio no pico da cheia que ocorreu em 2014 (Junho-Julho) e ficou ali depositada, sendo recoberta pelo sedimento suspenso que foi depositado logo em seguida quando o regime de fluxo decresceu neste canal.

Na cheia, apenas o rio Paraguai-Mirim (seção 47) contribui com a carga de fundo do rio Paraguai, uma vez que o rio Miranda não transporta sedimento de fundo nesse período, pois está barrado pelo rio Paraguai (Tabela 11). Na seca, esses dois afluentes fornecem sedimento de fundo ao rio Paraguai, embora o rio Paraguai-Mirim passe a ter menor contribuição (Tabela 12 [p.117]).

O balanço sedimentar da carga de fundo do rio Paraguai na área estudada modifica-se de acordo com o período hidrológico analisado (Tabela 13 [p.122] e Tabela 14 [p.125]; Figura 36 [p.121] e Figura 37 [p.124]). Na cheia, fica nítido que o trecho superior do rio Paraguai (seção 40 a 19) apresenta balanço de massa positivo indicando que nesse trecho o rio está sofrendo deposição (283,055 t/dia). Contudo, na seca, este trecho possui balanço de massa negativo indicando uma erosão média de 355,59 t/dia. Logo abaixo desse trecho existe um compartimento do rio Paraguai, que na cheia, torna-se um sítio deposicional (da seção 19 a 12 - Figura 36). Esse trecho apresenta um total de 153,605 t/dia de carga de leito sendo depositada no rio Paraguai na cheia (Tabela 13). Na seca, seu balanço ainda é positivo (134,665 t/dia), mas com trechos apresentando erosões mais intensas (Figura 37), mostrando que parte do sedimento que foi depositado na cheia é remobilizado na seca.

O trecho inferior do rio Paraguai apresenta, na cheia, balanço negativo (38,316 t/dia), indicando predomínio de erosão. Na seca, o balanço se torna positivo (158,013 t/dia), mostrando que essa região se torna um sítio deposicional. O trecho superior (seção 40 a 19) que na cheia possui predomínio de deposição, na seca, passa a sofrer erosão (355,590 t/dia).

**Figura 36** - Balanço sedimentar (carga de leito) do rio Paraguai na cheia (agosto 2014).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 13** - Balanço hidrossedimentar do rio Paraguai em agosto de 2014 (cheia).

Seção	Balanço descarga líquida (m³/s)	Balanço carga de leito (t/dia)	Balanço carga suspensa (t/dia)	Balanço carga dissolvida (t/dia)
40	-234,02	13,193	-38,821	-283,070
39	33,73	-1,288	5,829	40,800
38	-235,64	2,555	-47,437	-285,030
37	-30,31	96,971	-5,028	-35,354
36	-4,25	-234,084	-0,459	-4,957
35	38,66	216,244	6,948	46,763
34	147,39	-97,797	21,904	174,085
I-1-1	-79,19	133,395	-8,827	-94,082
I-1-4	-157,72	-4,970	-18,942	-186,281
33	-92,90	96,336	-14,046	-108,359
32	-83,28	-73,046	-15,614	-100,735
31	186,20	-413,720	33,462	225,228
30	-203,43	702,772	-26,365	-246,069
29	62,37	-194,635	7,652	75,443
28	-140,86	7,191	-23,367	-170,384
27	-23,87	4,314	-4,805	-28,873
26	-40,44	-56,758	-9,609	-47,169
25	-54,34	189,008	-12,113	-63,382
24	-141,24	-78,843	-26,481	-170,844
23	62,58	13,179	9,895	78,400
22	-39,63	50,265	-5,992	-49,648
21	-46,48	-34,044	-6,707	-56,222
20	-151,31	-53,183	-14,119	-183,025
19	-78,25	127,568	-11,291	-94,651
18	80,66	18,433	13,938	94,082
17	-40,51	5,748	-4,655	-49,001
16				

Fonte: Elaborado pelo autor.

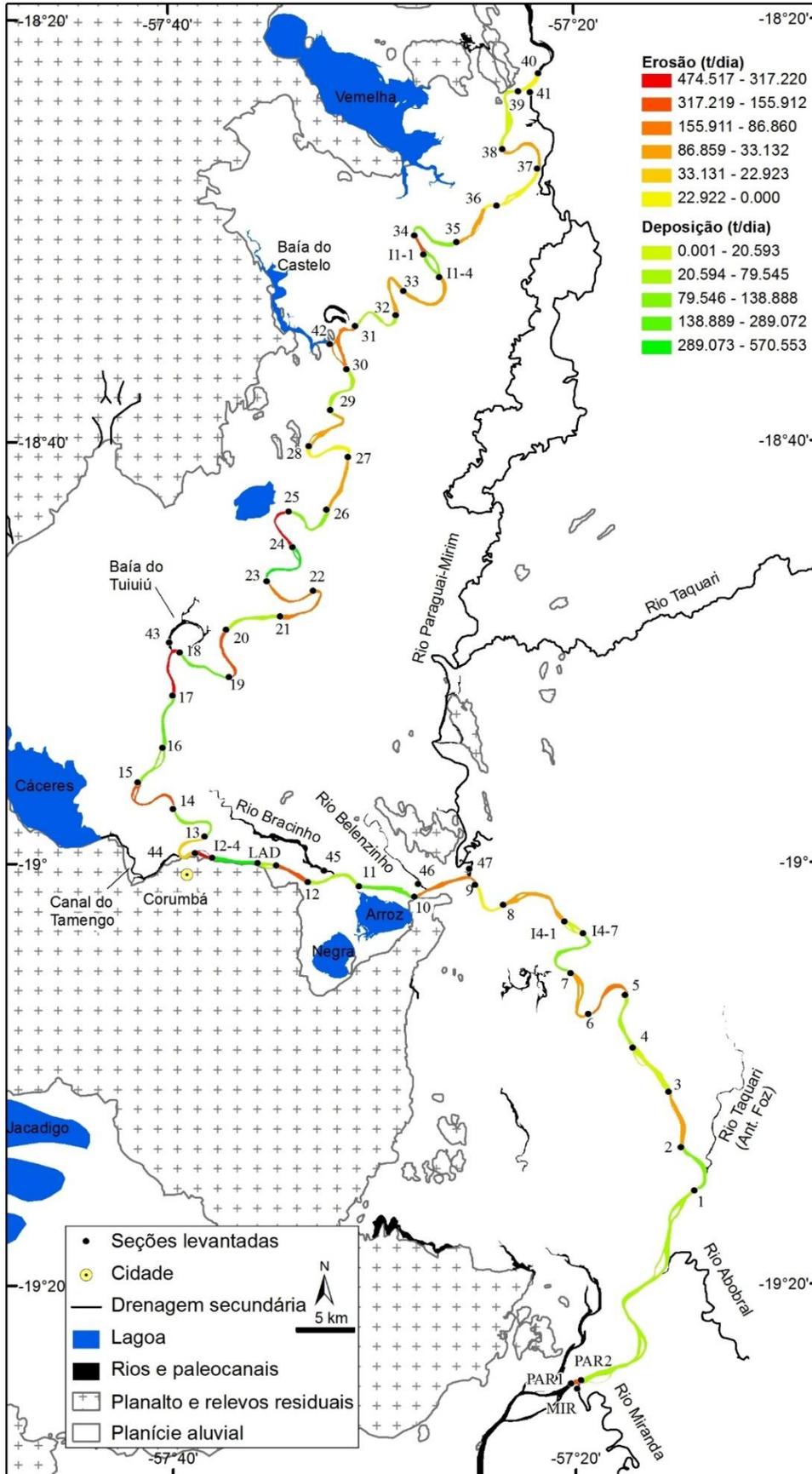
O balanço geral (seca + cheia) do trecho estudado mostra que o rio Paraguai, no tocante à carga de leito, apresenta balanço positivo, com deposição de 335,333 t/dia. Trechos que na cheia são deposicionais, na seca passam a ser erosivos, como o caso do trecho entre as seções 40 e 19, que possui balanço geral de 72,535 t/dia de erosão. Já os trechos inferiores (da seção 19 a foz do rio Miranda) são sítios deposicionais, com mais de 407 t/dia (Figura 38 [p.127]).

Os números do balanço sedimentar do rio Paraguai na área estudada permitem que seja produzida uma nova compartimentação do rio (Quadro 2 [p.128]), refinando assim a compartimentação feita anteriormente no item 5.2.3 (Tabela 2 [p.55]). Esses números comprovam que o preenchimento do sistema se dá de jusante para montante, em que os trechos inferiores estão em processo de agredação, e o trecho superior em processo de degradação/incisão.

**Tabela 13** - continuação

<b>Seção</b>	<b>Balanço descarga líquida (m³/s)</b>	<b>Balanço carga de leito (t/dia)</b>	<b>Balanço carga suspensa (t/dia)</b>	<b>Balanço carga dissolvida (t/dia)</b>
16	-151,93	0,670	-13,127	-190,338
15	-105,28	-7,043	-127,347	-122,799
14	-226,51	8,033	-27,790	-264,201
13	520,00	-2,611	78,624	673,916
I-2-1	-7,01	-5,602	-1,011	-9,081
I-2-4	-85,48	7,315	-11,078	-110,782
LAD	-23,30	0,050	-3,180	-33,212
I-3-4	-41,92	0,945	-8,150	-65,199
12	536,83	-59,324	112,245	788,496
11	-1,29	59,324	-0,214	-1,783
10	724,69	-297,166	88,911	1001,811
9	-101,04	76,852	-11,611	-126,583
8	-56,84	106,772	-8,201	-71,209
I-4-1	-96,93	15,063	-13,985	-121,430
I-4-7	-219,80	52,186	-42,730	-284,865
7	-165,42	-35,589	-33,301	-221,530
6	336,47	-133,421	50,874	450,601
5	-28,97	190,151	-5,006	-38,797
4	40,20	-87,151	6,356	52,099
3	-50,50	-3,660	-4,712	-63,266
2	346,72	-91,913	47,331	419,393
1	-68,01	169,560	-8,344	-79,327
PAR-2	110,94	-82,022	10,160	137,356
PAR-1				

**Figura 37** - Balanço sedimentar (carga de leito) do rio Paraguai na seca (novembro 2015).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 14** - Balanço hidrossedimentar do rio Paraguai em novembro de 2015 (seca).

<b>Seção</b>	<b>Balanço descarga líquida (m³/s)</b>	<b>Balanço carga de leito (t/dia)</b>	<b>Balanço carga suspensa (t/dia)</b>	<b>Balanço carga dissolvida (t/dia)</b>
40	-10,64	-6,771	-23,906	-9,195
39	-12,19	14,992	-25,797	-10,530
38	16,40	-51,254	31,175	14,170
37	31,95	-16,996	55,208	27,604
36	3,77	-48,484	4,564	3,260
35	-56,38	120,398	-80,372	-48,711
34	116,99	-170,141	197,111	101,083
I-1-1	-16,84	114,717	-32,011	-14,551
I-1-4	12,09	-35,108	25,066	10,444
33	-4,29	-46,456	-7,593	-3,704
32	-30,40	79,545	-47,278	-26,266
31	15,79	-92,161	23,876	14,326
30	16,56	46,101	36,485	15,023
29	-1,11	-67,778	-2,731	-1,006
28	23,79	-5,826	47,283	22,614
27	-48,23	-56,763	-87,507	-45,837
26	16,03	84,720	29,083	15,234
25	-0,66	-474,517	-1,144	-0,601
24	-32,00	570,553	-51,142	-27,645
23	41,34	-86,860	78,583	35,719
22	-12,49	-120,760	-26,432	-11,328
21	1,95	73,446	4,544	1,851
20	17,56	-180,187	41,711	16,684
19	-11,70	289,072	-22,741	-11,118
18	-13,10	-360,856	-23,199	-11,883
17	10,57	168,842	23,281	9,586
16	-8,05	114,688	-17,392	-7,653
15	27,81	-155,912	48,061	25,232
14	-19,66	138,888	-38,215	-16,985
13	102,24	-348,026	216,417	88,334
I-2-1	1,31	317,220	2,373	1,187
I-2-4	-46,39	89,952	-76,155	-42,086
LAD	10,07	44,451	19,139	8,700
I-3-4	17,90	-163,654	49,484	16,237
12	14,21	67,690	34,367	13,501
11	26,11	167,057	45,115	38,347
10	152,58	-98,667	329,581	224,115
9				

Tabela 14 - continuação

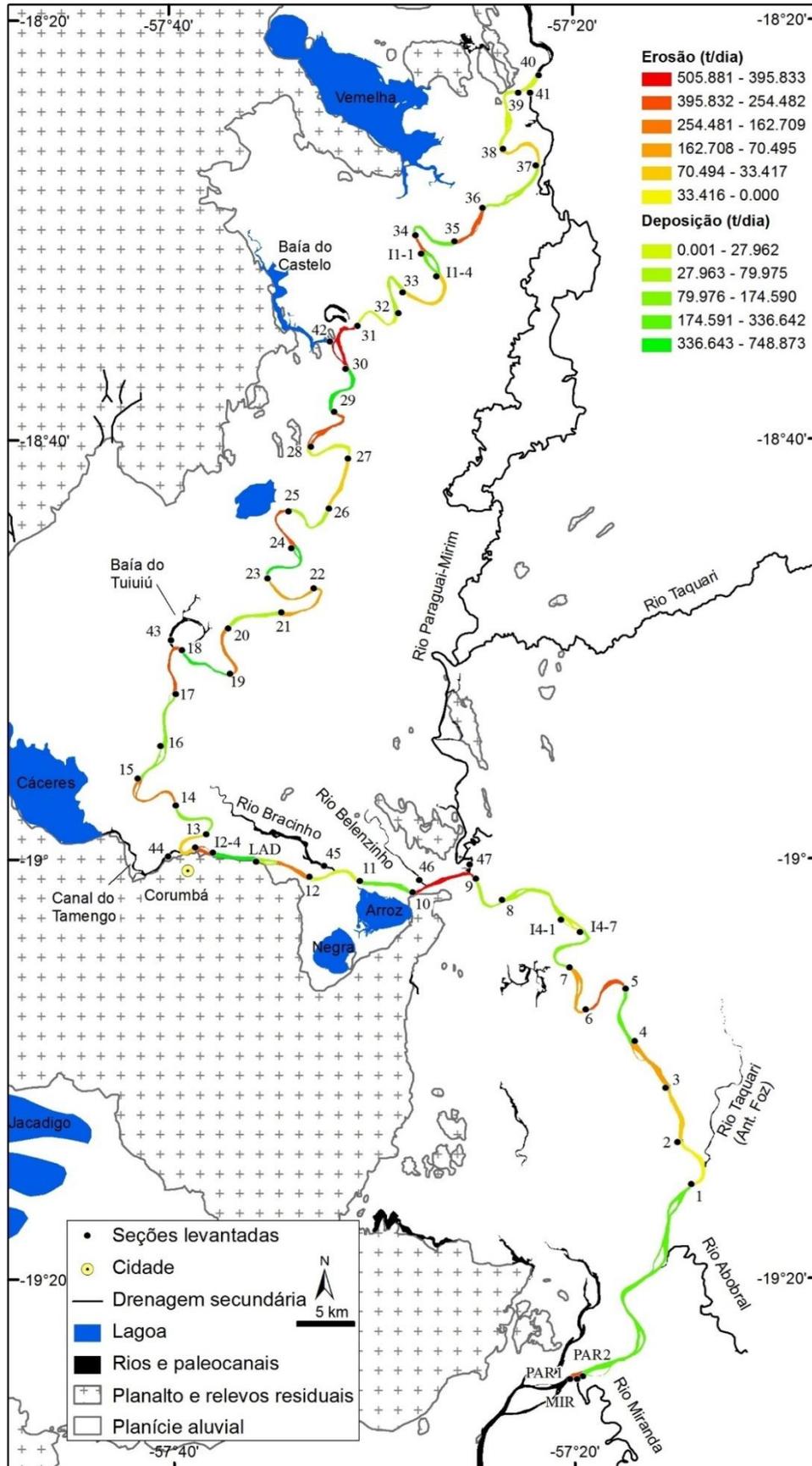
Seção	Balanço descarga líquida (m <sup>3</sup> /s)	Balanço carga de leito (t/dia)	Balanço carga suspensa (t/dia)	Balanço carga dissolvida (t/dia)
9	9,95	-15,975	19,353	9,461
8	-18,70	-37,081	-33,927	-17,772
I-4-1	21,91	4,339	40,314	20,819
I-4-7	-29,57	94,600	-56,201	-28,100
7	21,01	-65,922	32,681	19,972
6	-19,90	-121,061	-32,666	-18,912
5	46,94	49,595	83,142	44,613
4	-19,76	14,832	-37,564	-18,782
3	8,70	-36,249	16,539	8,269
2	60,85	87,229	134,060	57,830
1	-22,45	47,626	-46,556	-21,338
PAR-2	237,98	-374,117	544,872	226,173
PAR-1				

Com base na verificação desses dados, constatou-se que, de fato o rio Paraguai na área estudada possui dinâmica hidrossedimentar bastante complexa e compartimentos com funcionamento distintos de acordo com o período hidrológico analisado. Na seca, o rio comporta-se como um sistema de drenagem tributária convencional, com aumento da descarga a jusante. Já na cheia, o sistema se modifica completamente, mostrando um padrão de drenagem nada convencional, em que as águas que antes fluíam confinadas nos canais principais, passam a ser drenadas por sistemas relictos, ainda impressos na paisagem, como o caso do paleocinturão de meandros, onde atualmente flui o rio Paraguai-Mirim.

Essas peculiaridades do sistema causam um complexo regime de cheia dentro da PFPC, com implicações, tanto ecológicas, como para o próprio sistema deposicional da área, que se vê alterado de acordo com a hidrologia de cada período.

Além disso, as vazões ao longo do rio Paraguai mostram que a drenagem do sistema está sob efeito de remanso hidráulico em seu trecho médio, efeito este que parece ser causando, tanto por fatores hidrológicos, como geológicos.

**Figura 38** – Balanço sedimentar geral da carga de leito do rio Paraguai (diferença entre cheia e seca).



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Quadro 2** - Compartimentação do rio Paraguai na área estudada.

Trecho	Sinuo.	Dir.	Decliv. média <sup>1</sup>	Interação canal-planície	Carga de leito
1 (seção 40 a 19)	1,79	SSW	1,8 (cheia) 1,7 (seca)	Grande quantidade de água é extravasada para a planície na cheia, transferindo mais de 16 mil ton. de sedimento suspenso e 122 mil de dissolvido, em média, anualmente.	Na cheia, esse trecho é palco de sedimentação, que é remobilizada na seca, tornando-o um trecho de <i>bypass</i> . Anualmente, são erodidos mais de 26 mil ton. de sedimento de fundo, os quais são transferidos para os trechos inferiores do rio.
2 (seção 19 a 12)	1,20	SSW-ENE	0,7 (cheia) 2,4 (seca)	Compartimento com grande transferência de água e sedimento para planície, mas que está sob efeito de remanso dificultando assim o cálculo da quantidade de sedimento transferido para a planície.	Sítio deposicional na cheia devido à diminuição de capacidade do rio por conta da redução na velocidade de fluxo e no gradiente hidráulico. Mais de 105 mil ton. de sedimento são depositados anualmente.
3 (seção 12 a 9)	1,05	ENE	1,1 (cheia) 2,6 (seca)	Trecho que recebe, na cheia, água dos trechos 1 e 2, tanto por meio dos rios Bracinho e Belenzinho como pelo fluxo em lençol vindo da planície.	Trecho com predominância de erosão, principalmente entre as seções 10 e 9, onde o rio flui em <i>bedrock</i> . Quase 59 mil ton. são erodidos anualmente.
4 (seção 9 a 1)	1,35	SSE	1,2 (cheia) 1,7 (seca)	Trecho que sofre forte influência das águas vindas do leque do Taquari, perturbando assim seu balanço hidrossedimentar. A transferência de sedimento se dá principalmente para a planície na margem direita do canal (~7 mil t/ano).	Na cheia, esse trecho tem predomínio de deposição (89,290 t/dia), e parte desse material é removido na seca (25,693 t/dia). Contudo, mais de 23 mil ton. de sedimento de fundo são depositados anualmente.
5 (seção 1 ao rio Miranda)	1,17	SSW	1,0 (cheia) 1,4 (seca)	Recebe água, pela margem esquerda, dos rios Abobral e Miranda. Pela margem direita são transferidos no mínimo 517 t/ano, em média, de sedimento para a planície. As estimativas feitas pela estação Porto da Manga mostram que esse valor deve ser maior que 5 mil tons.	Mais de 79 mil ton. de carga de leito são depositados nesse trecho, anualmente. Quase 62 mil ton. são depositados na cheia. Na seca esse valor é reduzido para um pouco mais de 17 mil ton. Essa diferença entre cheia e seca é provocada principalmente pelo aumento do gradiente hidráulico na seca, o que aumenta a erosão.

Fonte: Elaborado pelo autor. <sup>1</sup>Declividade (cm/km) da lamina d'água calculada pela equação de Manning (ver [Macedo, 2013](#) e [Macedo et al., 2017b](#)).

### 7.2.3. Vazões de margens plenas, dominante e efetiva e as influências na morfologia do canal

Das vazões de um canal fluvial, qual seria a responsável pela sua construção e morfologia? Essa é uma das muitas indagações que vêm sendo formuladas por diversos autores (e.g. [WOLMAN; MILLER, 1960](#); [CROWDER; KNAPP, 2005](#); [LENZI et al, 2006](#); [MA et al, 2010](#)). Diante disso, esta parte da tese pretende analisar qual é a vazão que constrói e mantém o canal, ou seja, a vazão formativa do rio Paraguai na área estudada por meio da análise estatística de três categorias de vazões: a vazão de margens plenas (*bankfull*), a vazão dominante ( $Q_{dom}$ ), e a vazão efetiva.

Na literatura sobre o assunto, a vazão formativa pode ser estabelecida de três maneiras: a) pela vazão de margens plenas ( $Q_{bf}$ ); b) pela vazão que mais transporta água ( $Q_{dom}$ ); ou c) pela vazão efetiva ( $Q_{ef}$ ).

A vazão de margens plenas é definida como a vazão que o fluxo enche completamente o canal e, em que, acima dessa vazão ocorre o transbordamento das águas para a bacia de inundação ([LEOPOLD; MADDOCK, 1953](#)). Essa vazão possui significado morfológico, pois determina a transição entre os limites físicos e as mudanças hidráulicas no canal. Seria, portanto, o fluxo de maior eficiência na manutenção e modificação das dimensões do canal.

Outros autores definem a vazão formativa como sendo aquela que possui uma frequência de retorno igual a 1,5 anos ( $Q_{1,5}$ ) ([WOLMAN; MILLER, 1960](#)), valor este usado para se determinar a vazão de *bankfull* ([LEOPOLD; MADDOCK, 1953](#)).

A vazão efetiva foi definida por [Wolman e Miller \(1960\)](#) como aquela capaz de transportar a maior quantidade de sedimento ao longo da série histórica, sendo dessa forma obtida por meio da análise estatística da frequência das vazões ao longo do tempo. Originalmente, os autores utilizaram dados de carga suspensa, ao passo que outros autores utilizaram a carga de leito ([LEPOLD, 1994](#); [LENZI et al, 2006](#)), por entenderem que essa carga seria mais relevante nos processos de formação e mudanças morfológicas do canal.

A vazão efetiva da estação São Francisco foi calculada como igual a 2.900,50 m<sup>3</sup>/s (Figura 40A), valor muito próximo da vazão de margens plenas, que apresenta valor igual a 2.899,16 m<sup>3</sup>/s. Já a vazão dominante nessa estação é de apenas 1.114,50 m<sup>3</sup>/s.

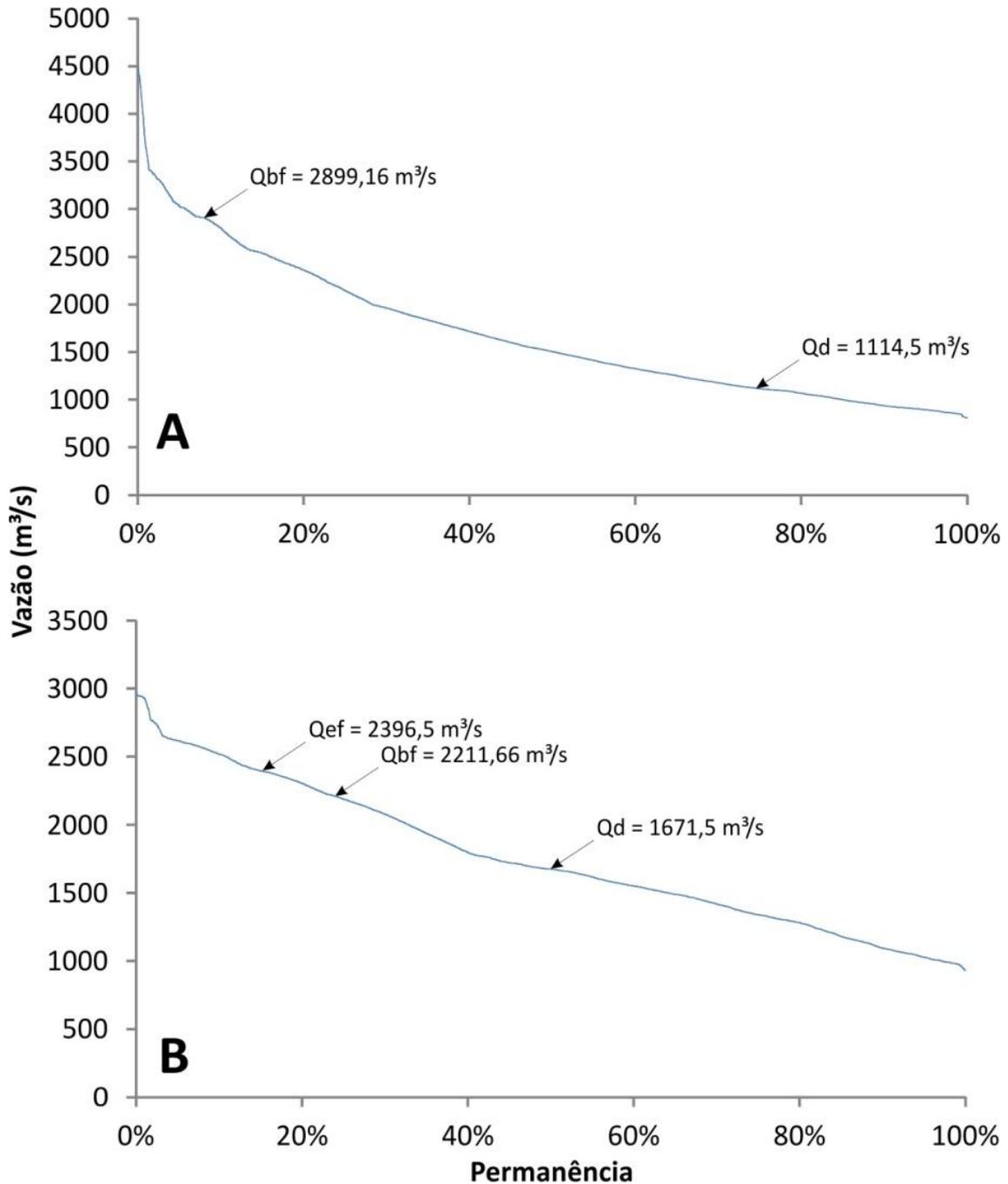
A vazão efetiva na estação Porto da Manga é igual a 2.396,50 m<sup>3</sup>/s e a vazão de margens plenas é igual a 2.211,66 m<sup>3</sup>/s. A vazão dominante nessa seção é igual a 1.671,50 m<sup>3</sup>/s (Figura 40B).

Após a determinação das frequências das vazões efetivas, de margens plenas e dominantes, as seções transversais das duas estações foram analisadas para a verificação da existência de mudanças na morfologia do canal. Perfis transversais das duas estações foram analisados de 1995 a 2011 e mudanças morfológicas foram constatadas nesse intervalo de tempo. As três descargas (*bankfull*, efetiva e dominante) ocorreram nos anos em que houve alterações na morfologia do canal, causando, assim, dúvidas sobre qual das vazões foi a principal responsável pelas mudanças.

Para sanar essa dúvida, os valores de permanência de cada vazão foram então analisados. No caso da estação São Francisco, essa dúvida não existe, já que a vazão efetiva é igual a vazão de margens plenas e a vazão dominante transporta uma quantidade muito pequena de sedimento de fundo (Figura 40A). Na estação Porto da Manga, a vazão efetiva teve uma permanência de 15%, contra uma permanência de 24% da vazão de margens plenas (Figura 39B), indicando que a vazão formativa em Porto da Manga seria a de margens plenas. No entanto, a vazão dominante apresentou permanência e transporte de sedimento maiores que a vazão de margens plenas (Figura 40B), e isso aponta para essa vazão como a vazão formativa do canal.

A interpretação dos dados morfológicos, regime hidrológico e respectivas permanências apontam a vazão de margens plenas como a de maior importância geomorfológica no canal do rio Paraguai no seu alto curso na PFPC. No baixo curso, a vazão formativa do canal do rio Paraguai seria a vazão dominante, posto que esta apresentou a maior permanência, mesmo não apresentando a maior quantidade de sedimento transportado.

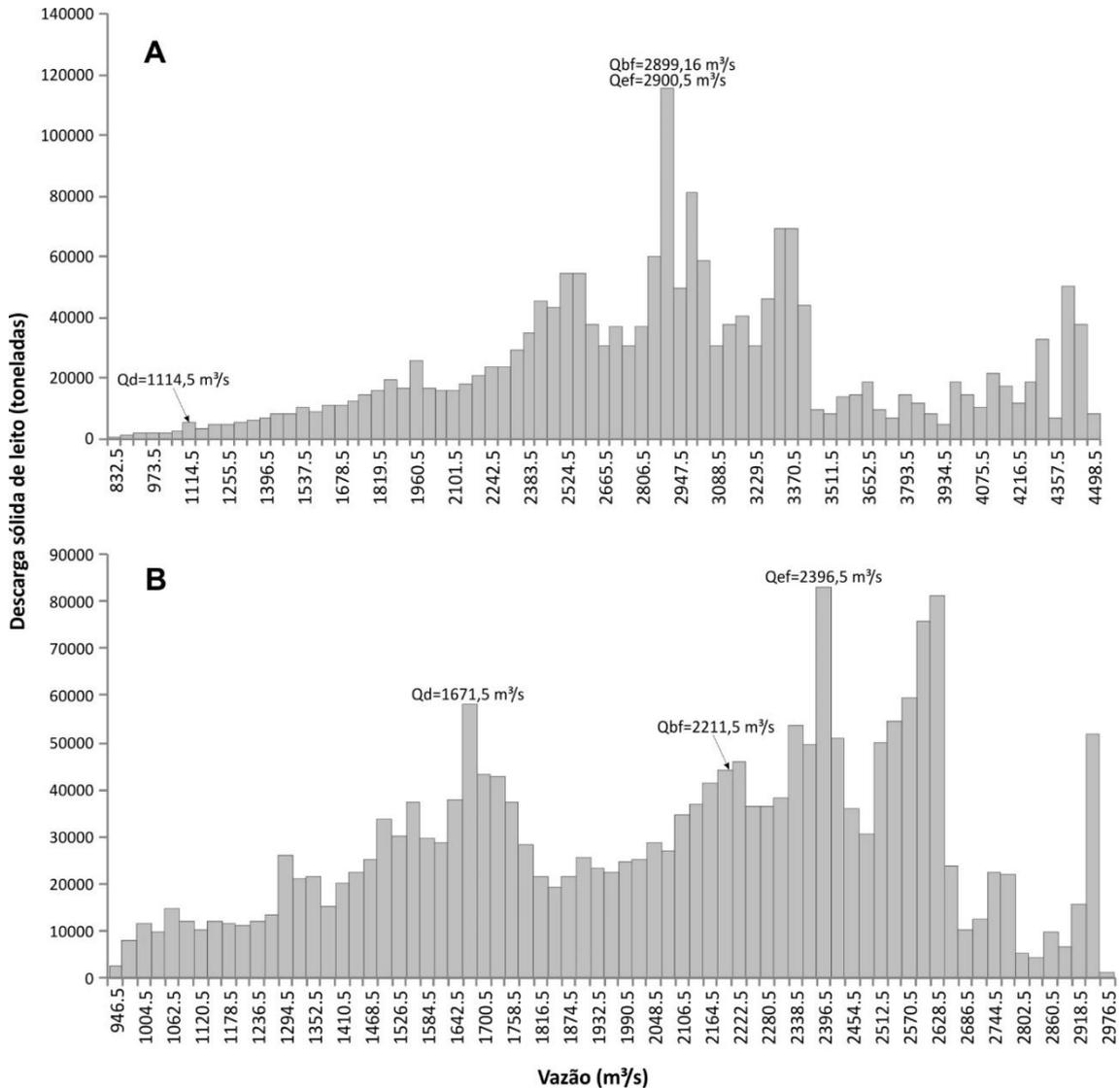
**Figura 39** - Curvas de permanência das vazões nas estações fluviométricas ANA.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) São Francisco; B) Porto da Manga.

Vale ainda ressaltar que é preciso mais dados de campo e investigações mais detalhadas para melhor definir a vazão formativa no médio curso do rio Paraguai, que apresenta comportamento hidrológico muito complexo, devido ao efeito remanso reconhecido nesse trecho do rio. A vazão formativa do rio Paraguai em Ladário não pode ser definida, pois a geometria hidráulica do canal neste trecho é fortemente perturbada pelo efeito remanso que existe na área.

**Figura 40** - Histogramadas descargas sólidas de leito, destacando-se as descargas efetivas (Qef), dominantes (Qd) e de margens plenas (Qbf).



Fonte: Elaborado pelo autor. A) São Francisco; B) Porto da Manga.

As vazões dominantes em ambas as estações fluviométricas apresentam alta valor de permanência (São Francisco=75%; Porto da Manga=50% – Figura 39A). Entretanto, essa vazão não transporta grande quantidade de sedimento de fundo na estação São Francisco, o que mostra que esse tipo de vazão possui pouca influência na morfologia do canal nessa localidade, ao contrário do que acontece em Porto da Manga, em que a vazão dominante parece ser a vazão formativa do canal do rio Paraguaí.

### 7.3. Estudos da geometria hidráulica do rio Paraguai

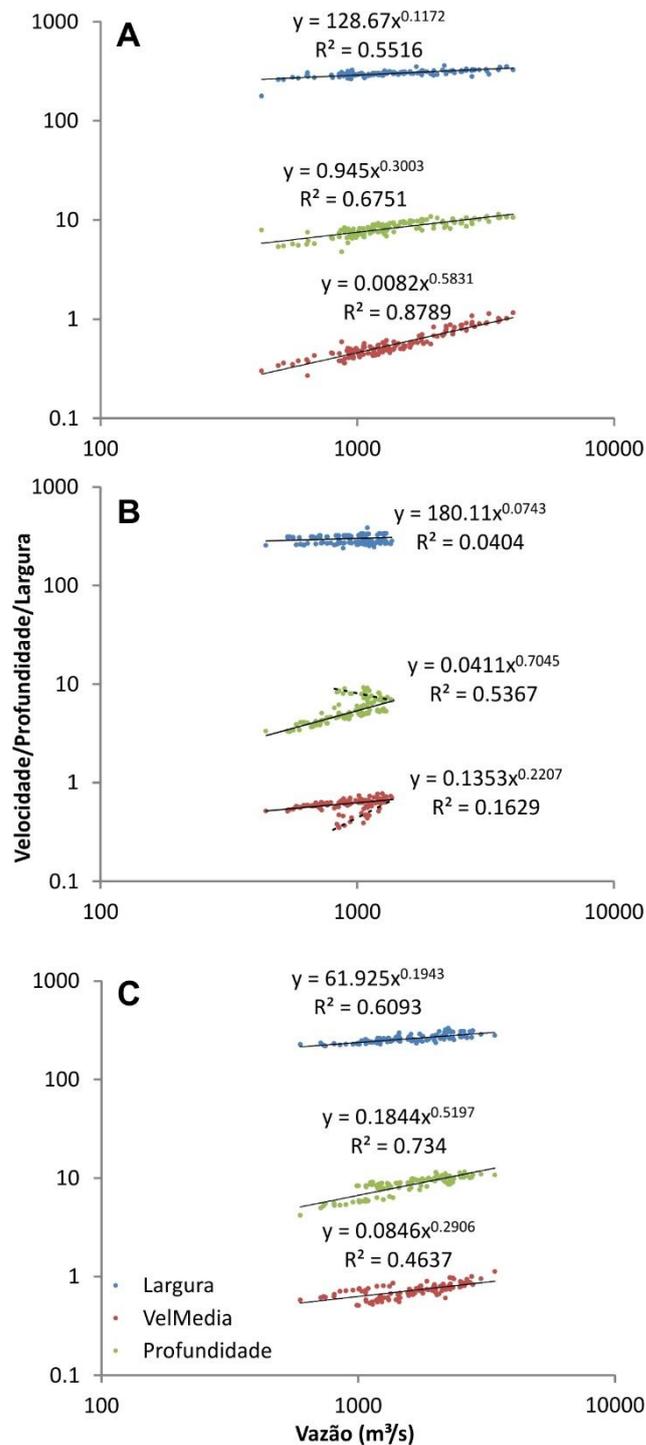
Poucos são os trabalhos que utilizam a geometria hidráulica como abordagem para estudos de sistemas fluviais no Brasil (e.g. [AQUINO et al., 2005](#); [GRISON, 2010](#)). Em sua maioria, os trabalhos com essa abordagem estão em outros países. [Turowski et al. \(2008\)](#) propuseram uma rediscussão da dinâmica de rios em planaltos com uso da geometria hidráulica e a concentração de sedimentos em rios das cadeias montanhosas de Taiwan. Outros autores criaram modelos preventivos para rios na Austrália ([De ROSE et al., 2008](#)). [Czapiga et al. \(2015\)](#) utilizaram o conceito de geometria hidráulica para quantificar conectividade, em termos de probabilidade de que um caminho conectado exista, de modo que um dado atributo permaneça dentro de limites específicos ao longo desse caminho. Para isso, os autores utilizaram dados de batimetria de quatro trechos de rios meandantes que possuem pelo menos cinco curvas. As relações de geometria hidráulica também podem ser utilizadas para identificar fases de margens plenas, e isso pode auxiliar em projetos de gestão de rios ([CHARLTON, 2008](#)). Outras aplicações podem ser consultadas em [Merritt e Wohl \(2003\)](#), [Singh et al., 2003](#), [Stewardson \(2005\)](#), [Dingman \(2007\)](#) e [Harman et al. \(2008\)](#).

No rio Paraguai, as variáveis da geometria hidráulica encontram-se diferenciadas para cada estação fluviométrica analisada (Figura 41). Diferenças também podem ser observadas quando analisada a geometria hidráulica a jusante (Figura 42 a Figura 44) em diferentes períodos. A velocidade média é a variável que mais modifica a vazão na estação São Francisco. Já em Ladário, a profundidade é a variável que mais altera a vazão, assim como em Porto da Manga. Essas mudanças de uma estação a outra podem representar uma alteração no comportamento hidráulico ao longo do rio Paraguai, e isso é comprovado quando observado a geometria hidráulica realizada com as seções levantadas em campo (Figura 42 a Figura 44).

As estações Ladário e Porto da Manga possuem geometria hidráulica semelhantes, indicando que nessas duas seções o rio Paraguai apresenta comportamento hidráulico parecido. Nas três estações, a largura sofre pouco ajuste em função da vazão, e isso é um indicativo de que o canal, nos três locais, teria forma em U (*U-shaped*). Todavia, conforme visto em item anterior desta tese (7.2.1), a estação São Francisco apresenta seção transversal com forma em V (*V-shaped*).

A pouca alteração da largura em função da vazão na estação São Francisco é devido ao fato de que, nessa seção, o rio Paraguai não atinge cotas muito baixas, o que causaria maiores mudanças na largura do canal.

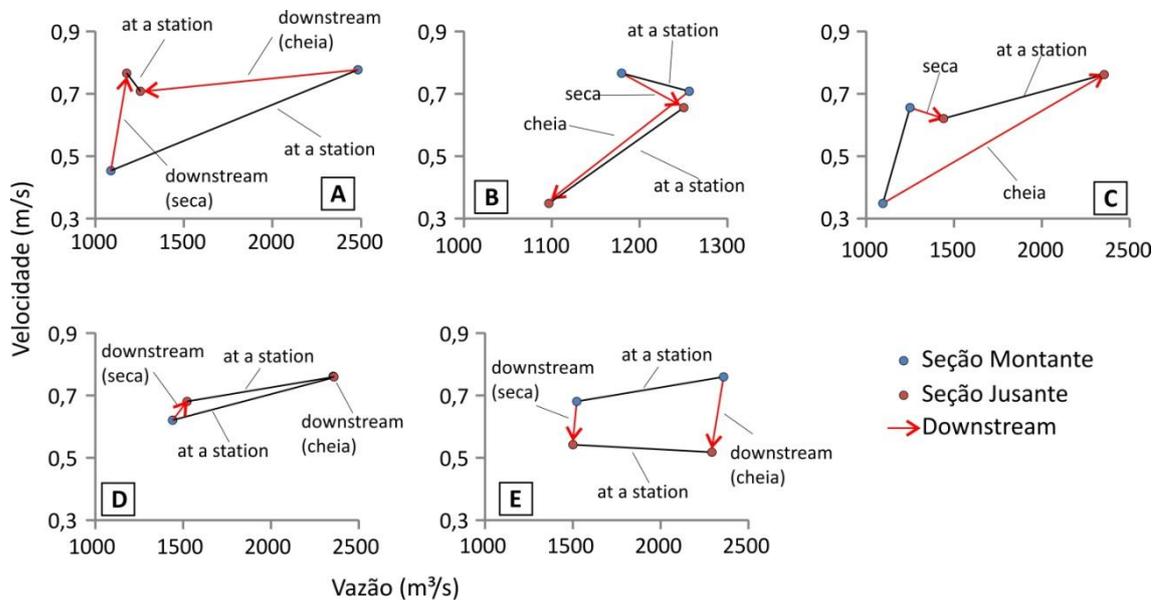
**Figura 41** - Geometria hidráulica na seção transversal (at a station) das três estações fluviométricas na área estudada.



Fonte: Dados Hidroweb-ANA. A) São Francisco; B) Ladário; C) Porto da Manga.

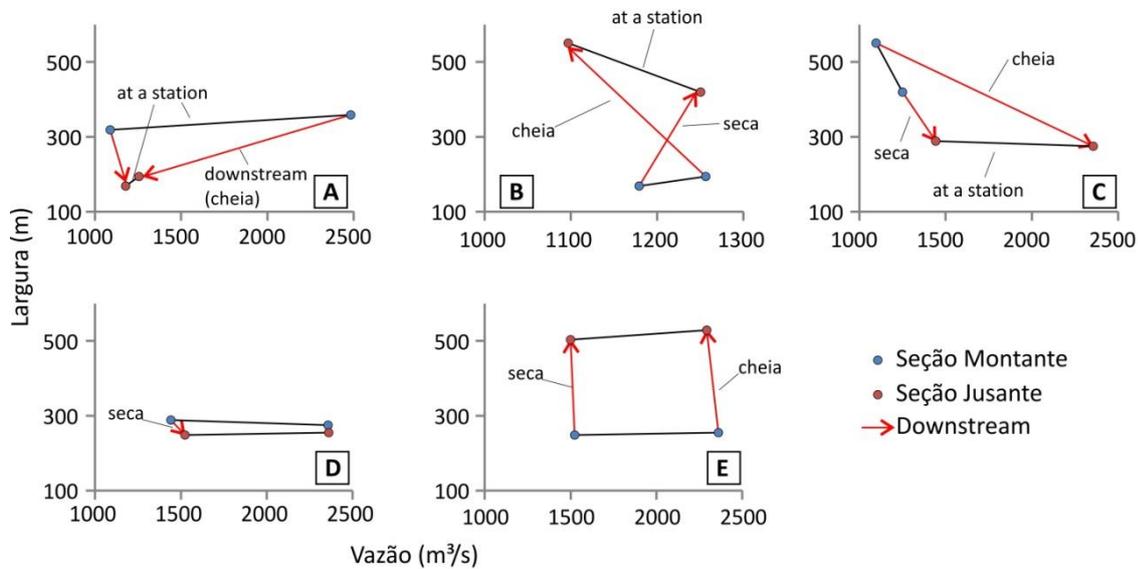
A estação Ladário apresenta baixo índice de correlação e alta dispersão da velocidade de fluxo com relação à vazão (Figura 41B). Além disso, a profundidade e velocidade de fluxo aparentam apresentar duas curvas de ajuste a vazão (Figura 41B). Essas características em Ladário mostram o efeito remanso que existe nesse trecho do rio. Isso ocasiona em Ladário sua característica mais marcante, em que uma mesma vazão pode estar associada a duas velocidades de fluxo diferentes, o que impossibilita o cálculo da vazão efetiva nesta estação.

**Figura 42** - Geometria hidráulica a jusante (downstream) para a variável velocidade média, realizada com uso das seções levantadas em campo.



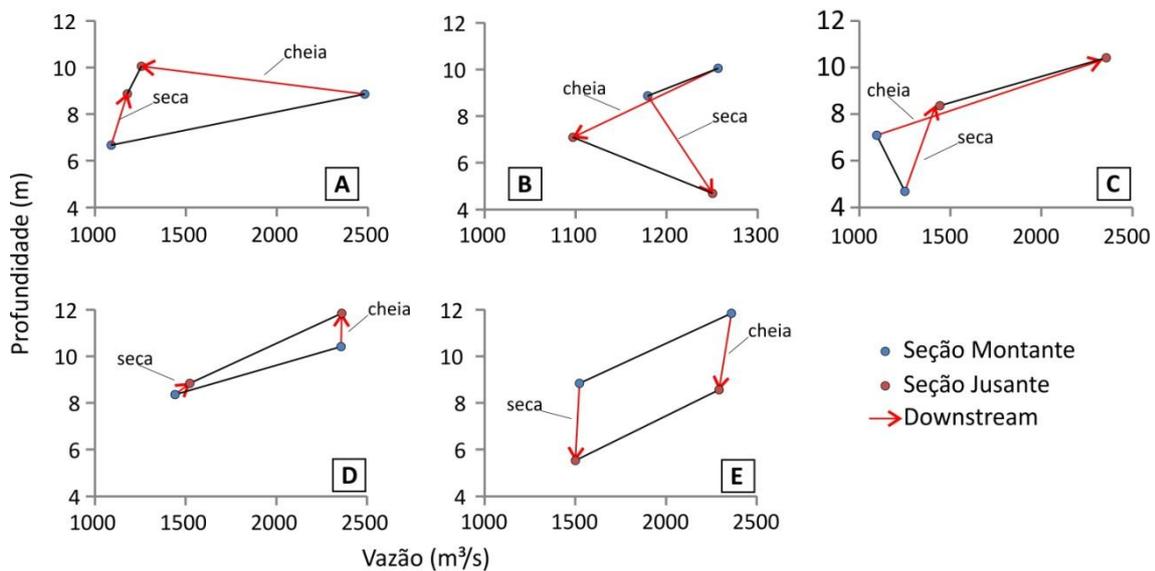
Fonte: Elaborado pelo autor. A) trecho 1: seção 40 a 19; B) trecho 2: seção 19 a 12; C) trecho 3: seção 12 a 9; D) trecho 4: seção 9 a 1; E) trecho 5: seção 1 a PAR1.

**Figura 43** - Geometria hidráulica a jusante (downstream) para a variável largura, realizada com uso das seções levantadas em campo.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) trecho 1: seção 40 a 19; B) trecho 2: seção 19 a 12; C) trecho 3: seção 12 a 9; D) trecho 4: seção 9 a 1; E) trecho 5: seção 1 a PAR1.

**Figura 44** - Geometria hidráulica a jusante (downstream) para a variável profundidade média, realizada com uso das seções levantadas em campo.



Fonte: Elaborado pelo autor. A) trecho 1: seção 40 a 19; B) trecho 2: seção 19 a 12; C) trecho 3: seção 12 a 9; D) trecho 4: seção 9 a 1; E) trecho 5: seção 1 a PAR1.

Resultados interessantes foram encontrados na análise da geometria hidráulica a jusante. Dependendo do período do ano e do trecho analisado, o comportamento das variáveis geométricas e hidráulicas do rio Paraguai se altera. O trecho superior do sistema possui tendência de ajuste com relação direta na geometria do canal em função da vazão. A velocidade é a única variável que possui

comportamento diferente nesse trecho. Enquanto a largura e a profundidade aumentam a jusante com o aumento da descarga, a velocidade tende a diminuir (Figura 42A a Figura 44A). No período seco, esse trecho sofre aumento de descarga a jusante, com o canal se tornando mais estreito e fundo. Na cheia, o canal mantém essa relação geométrica, mas diminui a velocidade do fluxo a jusante, causando dessa forma redução na vazão (que também é acentuada pela perda de água para a planície).

O segundo trecho é o que apresenta as relações geométricas e hidráulicas mais complexas. Nesse trecho, o rio Paraguai se torna progressivamente mais largo e raso e ocorre uma inversão entre cheia e seca (Figura 42B a Figura 44B). As descargas que deveriam ser maiores na cheia são maiores na seca. A seção 12, que é o ponto mais a jusante desse trecho, possui geometria hidráulica com expoentes negativos para as variáveis geométricas (largura e profundidade). A velocidade média do fluxo nessa seção sofre os maiores ajustes em função da vazão. Na seção 19, ponto mais a montante do segundo trecho, a geometria hidráulica é oposta à da seção 12. Essas características são refletidas numa geometria hidráulica a jusante bastante peculiar. Na seca, o canal nesse trecho se torna mais largo e raso a jusante, à medida que vai ganhando velocidade de fluxo. Na cheia, a velocidade de fluxo diminui a jusante, mas as relações geométricas se mantêm.

O terceiro trecho tem a característica de estar condicionado por falha na borda da bacia e apresentar variação na geometria hidráulica de acordo com período hidrológico. A largura é a única variável que apresenta diminuição a jusante. A profundidade tende a aumentar a jusante. A velocidade do fluxo é a única variável que apresenta comportamento diferente de acordo com período hidrológico. Na seca, a velocidade diminui a jusante, mas na cheia, a velocidade aumenta significativamente. Como o aumento da descarga a jusante na seca é bem menor, as variáveis geométricas e hidráulicas nesse trecho sofrem ajustes menores e são regidos principalmente por ajustes na geometria do canal. Na cheia, o maior volume de água que adentra o sistema neste trecho causa maiores ajustes no canal, que para comportar o aumento da descarga, ajusta tanto a velocidade do fluxo como a profundidade do canal.

O quarto trecho, que está compreendido entre as seções 9 e 1, apresenta geometria hidráulica menos perturbada que os demais trechos. Em ambas as

seções que limitam esse trecho, as variáveis geométricas e hidráulicas apresentaram relação direta com o aumento da descarga. A largura é a variável que menos sofre ajustes. A profundidade é a variável que mais se ajusta às mudanças na descarga. Essas características mostram que o canal nesse trecho vai se tornando estreito e profundo a jusante. Na seca, ocorrem ajustes a jusante, principalmente nas variáveis largura e velocidade. Na cheia, o ajuste a jusante é regido principalmente pelo aumento da profundidade do canal. Nesse período, a velocidade de fluxo sofre diminuição visto que os ajustes na profundidade compensam a velocidade.

O quinto trecho do rio Paraguai na PFPC é o trecho mais a jusante do sistema e possui características geométricas e hidráulicas que mostram que o canal se torna mais raso e largo a jusante. As seções que delimitam esse trecho apresentam geometria hidráulica semelhante, com exceção da velocidade do fluxo que tende a diminuir na seção próxima a foz do rio Miranda (seção PAR1). O trecho apresenta diminuição na vazão a jusante na cheia (Figura 42E a Figura 44E) devido à perda de água para planície. Porém, a vazão também diminui a jusante na seca, fato este causado, principalmente, pela diminuição tanto da profundidade como da velocidade do fluxo (Figura 42E e Figura 44E). Essas características mostram que o trecho apresenta diminuição na capacidade do fluxo, que fica mais lento e com menor área de escoamento.

Esses resultados mostram que o rio Paraguai possui dinâmica hidráulica diferente de acordo com o período hidrológico em questão. Na seca, o rio Paraguai aumenta a descarga a jusante e isto é traduzido em um canal mais largo e raso. Já na cheia, o rio possui uma dinâmica um pouco mais complexa, com diminuição de vazão a jusante no trecho entre a estação São Francisco e a confluência do rio Paraguai-Mirim (MACEDO et al., 2017b). Após confluência com rio Paraguai-Mirim, o rio Paraguai passa a aumentar sua vazão a jusante até a confluência com o rio Miranda.

As diferenças percebidas entre as três estações ANA podem ainda denotar outra questão já levantada na literatura e que está relacionada com um fenômeno hidráulico ainda pouco conhecido no Pantanal: efeito de remanso (COLLISCHONN et al., 2005; MACEDO et al., 2017b). Esse fenômeno é difícil de ser visualizado pela análise da geometria hidráulica, mas é bem nítido quando observada a relação cota-

vazão das estações (Figura 28 [p.98]). De toda forma, a perda de relevância da velocidade na geometria hidráulica das estações Ladário e Porto da Manga parece estar de alguma forma ligada ao efeito remanso presente neste trecho do rio Paraguai.

#### **7.4. Conclusões**

A PFPC é um sistema com funcionamento peculiar e complexo. A dinâmica hidrossedimentar do sistema se distancia dos modelos preconcebidos na literatura. O sistema possui mudança de dinâmica de acordo com o período hidrológico. Na seca, esse sistema se comporta como uma drenagem tributária convencional, com aumento de descarga líquida a jusante. Na cheia, o sistema é alterado e surgem perturbações nas vazões do rio Paraguai, as quais modificam a morfodinâmica do rio.

A carga sedimentar suspensa do rio Paraguai é algo bem peculiar desse sistema, que tem menores concentrações de sedimento nos períodos de cheia. Essa característica é causada pela dinâmica hidrológica da bacia do Pantanal, que possui sistema de drenagem distributário nas porções proximais a área fonte (megaleques fluviais). Portanto, grande parte do sedimento que é produzido nas áreas planálticas fica retida nos leques fluviais que estão à montante do rio-tronco. Ademais, a cheia na PFPC ocorre fora de fase do período chuvoso da bacia.

A análise da geometria hidráulica do rio Paraguai na PFPC revelou que o rio possui comportamento hidráulico distinto de acordo com período hidrológico e com o compartimento do rio. A hidráulica do rio Paraguai na estação São Francisco é regida pela velocidade do fluxo, que sofre os maiores ajustes em função da vazão. No médio e baixo curso do rio Paraguai, a profundidade passa a ser o principal ajuste na hidráulica do rio. A perda de importância da velocidade na hidráulica evidencia que a geometria hidráulica se altera ao longo do rio, e isto é comprovado quando a geometria hidráulica a jusante é analisada.

Em águas baixas, o rio Paraguai possui aumento de vazão a jusante com o rio se tornando mais raso e largo. Na cheia, a hidrologia do sistema é modificada, principalmente em virtude da perda de água do canal do rio Paraguai para sua planície. A água transferida para a bacia de inundação é drenada tanto por fluxo em lençol como por antigos canais que atualmente estão em processo de abandono e

que marcam paleo-drenagem da área. Como exemplo dessa paleo-drenagem, tem-se o paleocinturão de meandros, onde fluiu nos dias atuais o rio Paraguai-Mirim, e que drena boa parte da água que extravasa do rio Paraguai. A água transferida para a bacia de inundação retorna ao rio Paraguai, principalmente, em seu médio curso (trecho entre as seções 13 e 9). Essa água que retorna nesse trecho pode ainda ser uma das responsáveis pelas perturbações hidrológicas reconhecidas na área (efeito remanso).

A análise estatística das vazões do rio Paraguai permitiu determinar qual é a vazão responsável pela construção/manutenção do canal. Na estação fluviométrica de São Francisco constatou-se que a vazão formativa é a vazão de margens plenas. No baixo curso do rio Paraguai a vazão formativa foi definida como sendo a vazão dominante. No médio curso do rio Paraguai não foi possível determinar qual seria a vazão formativa, e isso é assunto que merece mais estudos.

## 8. ESTUDO PRELIMINAR DA MORFODINÂMICA DE TRECHOS MULTICANAIS NO RIO PARAGUAI

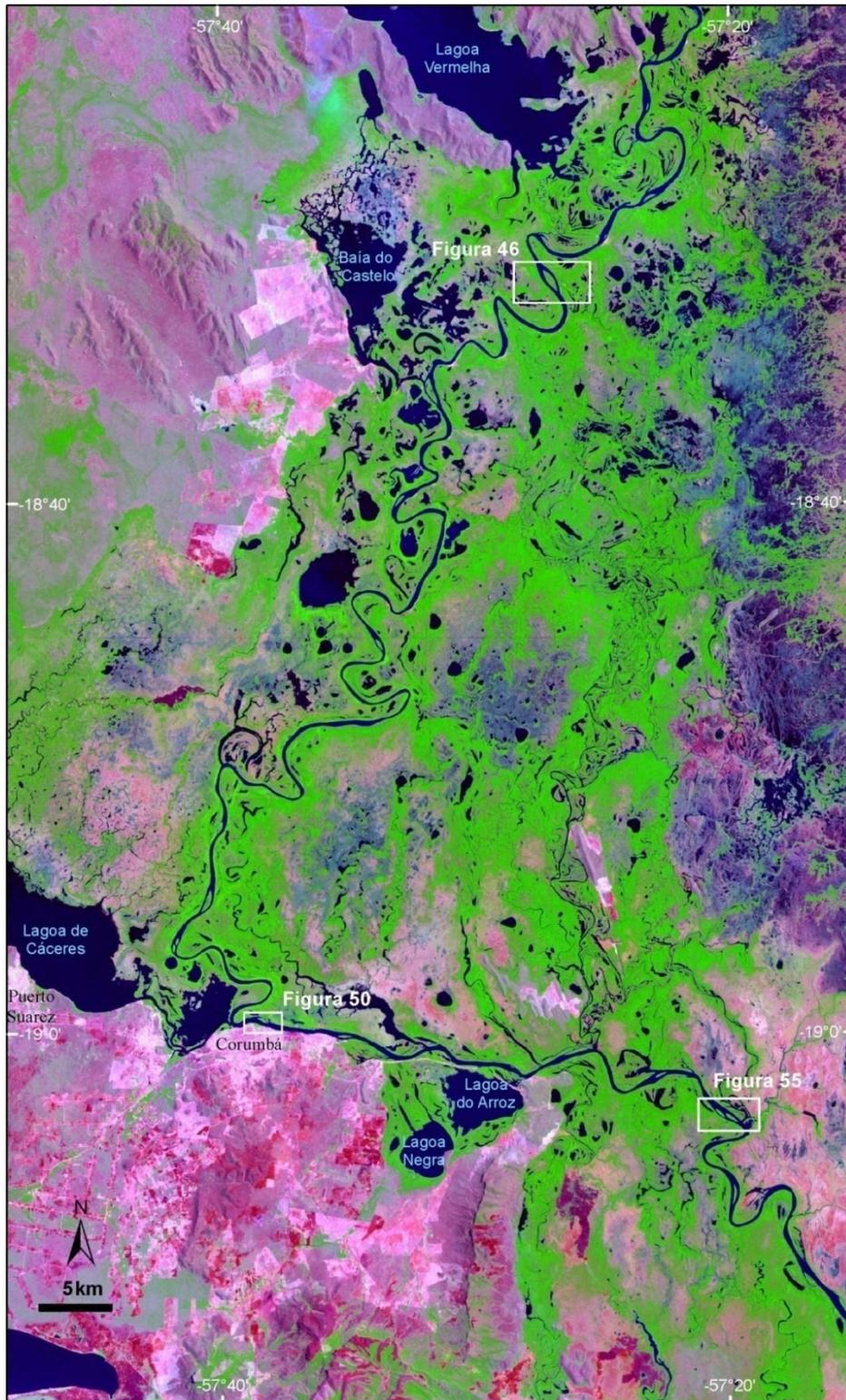
Os sistemas fluviais possuem quatro tipos básicos de arranjo espacial: retilíneo, meandrante, entrelaçado e anastomosado (MIALL, 1977; LEOPOLD et al., 1995). O último tipo tem sido alvo de questionamentos e alguns autores têm dado nova nomenclatura a este, chamando-o de sistema *anabanching* (NANSON; KNIGHTON, 1996; NANSON; GIBLING, 2004; CARLING et al., 2014).

Os rios *anabanching* são assim chamados em consequência de ilhas que dividem o canal principal em dois ou mais canais. Esse tipo de padrão de canal ocorre em diversos contextos geográficos independentemente do clima e da geologia de suas bacias. Apesar de esse tipo ser o padrão dominante nos maiores rios do mundo (JANSEN; NANSON, 2004; LATRUBESSE, 2008), seu estudo ainda necessita ser ampliado, principalmente com relação à hidráulica e hidrossedimentologia. Até recentemente, a maioria dos estudos com relação a sistemas fluviais *anabanching* ocupava-se da comparação entre descarga líquida, tamanho da bacia e padrão de canal (LATRUBESSE; FRANZINELLI, 2005; LATRUBESSE, 2008; CONWAY; MAHÉ, 2009; LATRUBESSE et al., 2009; ASHWORTH; LEWIN, 2012; SINHA et al., 2012; CARLING et al., 2014; REESINK et al., 2014; LATRUBESSE, 2015), ficando a morfodinâmica do canal relegada a segundo plano.

O rio Paraguai, na área estudada nesta tese, possui extensão de mais de 200 km e, ao longo desse trecho, há ocorrência de multicanalização do rio por causa da existência de ilhas construídas por processos intracanal (MACEDO, 2013). Esse padrão *anabanching* do rio Paraguai pode ser considerado incipiente se comparado com o rio Paraná (LELI, 2015; DOS SANTOS, 2010; GON, 2012; NICHOLAS et al., 2012; 2013; REESINK et al., 2014) ou com os rios Negro, Solimões e Madeira na bacia amazônica (LATRUBESSE, 2008; LATRUBESSE; FRANZINELLI, 2005), que possuem um sistema de ilhas fluviais bem mais notável. No entanto, as constantes multicanalizações existentes neste trecho do rio Paraguai chamam atenção para a dinâmica hidrossedimentar desse rio, que, conforme visto no capítulo anterior, possui hidrossedimentologia bastante peculiar se comparado com os sistemas fluviais em contexto de bacias localizadas em planaltos.

Diante disso, o presente capítulo realizou estudo da morfodinâmica de trechos multicanais do rio Paraguai e, para isso, três trechos multicanais na área estudada foram selecionados (Figura 45).

**Figura 45** - Localização dos trechos multicanais estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Landsat 7 ETM+ (R7G4B3).

## 8.1. Materiais e Métodos

Para este estudo, levantamentos hidrossedimentares foram realizados nos trechos selecionados. Um total de 15 seções, para levantamento de dados hidráulicos (perfil transversal, velocidade e direção de fluxo) do canal, foi levantado com uso de *Acoustic Doppler Current Profiler* (RiverRay™ ADCP) sendo, quatro no trecho ilha Laranjeira, quatro no trecho ilha Limoeiro, e sete no trecho ilhas do Formigueiro (Figura 45, Figura 46 [p.145], Figura 51 [p.154] e Figura 57 [p.163]).

Duas amostras para análise textural e concentração de sedimento suspenso e dissolvido a montante e a jusante de cada ilha, bem como uma amostra em cada braço de canal de cada trecho foram coletadas. As amostras de sedimento suspenso e dissolvido foram coletadas, no período seco, com uso de um amostrador vertical contínuo. Na cheia, essas amostras foram coletadas em uma profundidade máxima de 20 cm. As amostras de carga de fundo foram coletadas com uso de um amostrador de mandíbula do tipo Van Veen. A análise da concentração do sedimento suspenso foi realizada com uso de um espectrofotômetro (Hach DR2800™). A concentração de sedimento dissolvido foi estabelecida por meio da condutibilidade elétrica da amostra (YSI 556 MS™). A granulometria da carga de fundo foi feita pelo método de peneiramento.

Levantamento batimétrico dos trechos estudados foi realizado por ecobatímetro (Furuno™). Seções transversais espaçadas ~100 metros umas das outras foram levantadas no período de cheia (agosto de 2014). Os pontos coletados nesse levantamento foram inseridos em um Sistema de Informação Geográfica (SIG - [ESRI, 2010](#)) e interpolados pelo método *Triangular Irregular Network* (TIN). A interpolação realizada permitiu a geração dos mapas batimétricos do rio Paraguai na região das três ilhas estudadas (Figura 46, Figura 51 e Figura 57), possibilitando assim a visualização da morfologia de leito do rio Paraguai.

Os cálculos das descargas sólidas foram feitos com base nos parâmetros hidráulicos (largura, perímetro úmido, vazão e velocidade de fluxo) e sedimentológicos (concentração e granulometria). As descargas sólidas suspensas e dissolvidas foram calculadas pela multiplicação da vazão pela respectiva concentração sedimentar, sendo feita as devidas conversões de unidades. A descarga sólida de leito foi calculada pelo método de Van Rijn ([MACEDO et al., 2017a](#)).

Os cálculos de balanço sedimentar e estimativa de transferência de água para planície e para as ilhas foram realizados por meio da subtração dos valores de descarga sólida e líquida das seções a montante pelas seções a jusante. No caso da descarga líquida, caso o resultado dessa subtração for menor que zero, significa que não houve transferência de água para a planície. Caso contrário, significa que houve transferência e o valor dessa subtração corresponde à quantidade de água transferida. Com os valores de concentração de sedimentos e de água transferida, foram calculadas as quantidades de sedimento (suspenso e dissolvido) transferidas para a planície. A mesma lógica de subtração foi utilizada para a descarga sólida de leito.

## **8.2. Resultados e discussões**

### *8.2.1. Trecho Ilha Laranjeira*

A ilha Laranjeira está situada 110 km a montante do porto geral da cidade de Corumbá. Essa ilha possui forma ocelar ou elíptica com eixo maior medindo aproximadamente 1.767 metros e eixo menor medindo 470 metros. Seu perímetro mede em torno de 3.760 metros e sua área é de ~0,55 km<sup>2</sup>.

Suas características morfológicas revelam uma típica ilha de barra central composta (LELI, 2015) formada pela acreção de depósitos de barra no meio do canal. Marcas de crescimento dessa ilha indicam que ela se formou a partir de um núcleo (*core island*) localizado mais ou menos no centro do canal e que esse núcleo foi crescendo tanto lateralmente (eixo menor) quanto longitudinalmente (eixo maior). Contudo, datações pelo método LOE/SAR (capítulo 6) revelaram que a margem esquerda (leste) da ilha é pelo menos 370 anos mais velha que a margem direita (oeste).

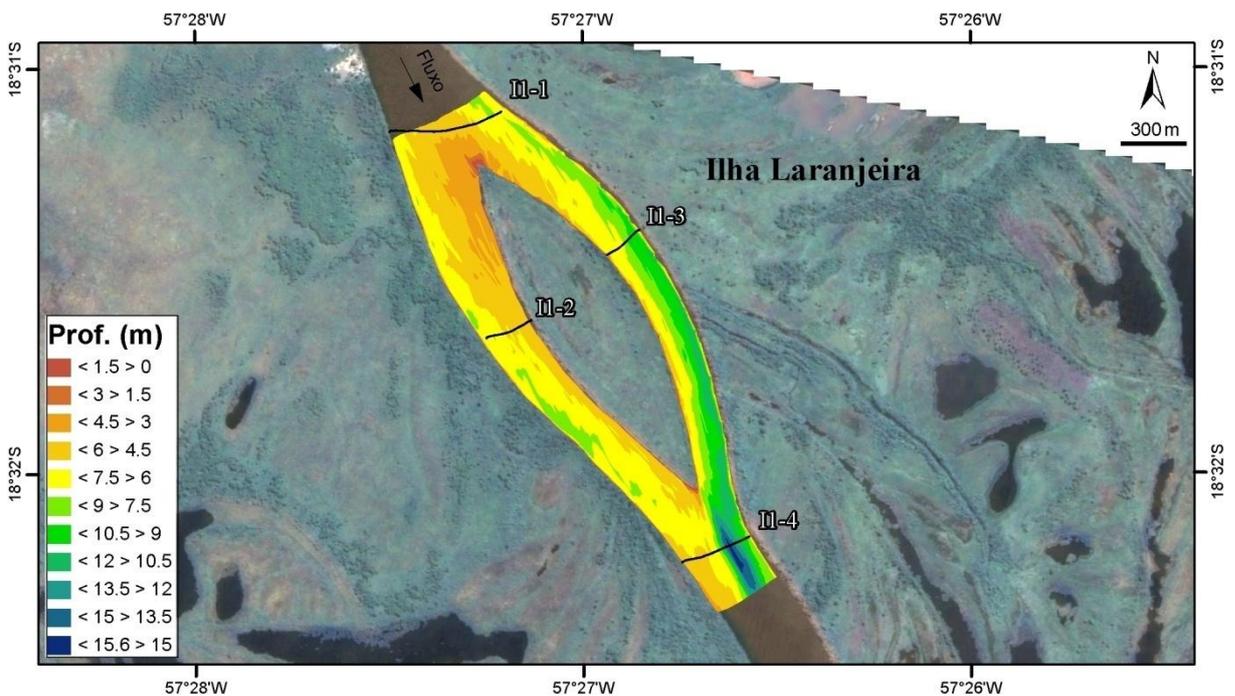
Os depósitos que formam esta ilha são compostos basicamente de areia fina a muito fina na base e silte nas partes superiores (Figura 24 – p.76). Idades desses depósitos mostram que essa morfologia se formou no Holoceno superior (entre ~1000 e 800 anos AP) e que a margem esquerda tem uma taxa de deposição (1,7 mm/ano) maior que a margem direita (0,9 mm/ano), que é mais jovem.

Antes de se bifurcar, o rio Paraguai apresenta largura de 225 metros. Na ponta montante da ilha, a largura do canal sobe para 620 metros. No centro da ilha, a largura total do canal (somado a largura da ilha) é de 880 metros. Na ponta jusante

da ilha, a largura diminui para 430 metros, diminuindo para 325 metros quando o rio retorna para canal único, 200 metros a jusante da ponta jusante da ilha.

Levantamento batimétrico realizado na cheia de 2014 (cota em Ladário de 502 cm) mostrou que o rio Paraguai, no trecho da ilha mapeada, apresenta profundidade média de 6,30 m, com máxima de 15,60 m (Figura 46). Na seca esses valores correspondem a 4,17 m e 13,47 m, respectivamente. O braço esquerdo possui as maiores profundidades, com o talvegue do rio na margem esquerda. Após a ilha, onde o canal se torna único novamente, o talvegue do rio atinge profundidades de quase 16 m. Nesse local, o talvegue continua a ocorrer na parte esquerda do canal (Figura 46 e Figura 48). O braço esquerdo também possui as maiores velocidades médias de fluxo (Tabela 15 [p.147]).

**Figura 46** - Batimetria e localização das seções ADCP levantadas na Ilha Laranjeira.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Landsat TM5 fundida a imagem CBERS-HRC.

Os dados batimétricos também revelam que o local de deposição preferencial desse trecho ocorre na ponta montante da ilha no braço direito do canal (Figura 46). Esse local apresenta as menores profundidades e imagens orbitais mostram depósitos se formando na cabeceira montante da ilha (Figura 47).

A vegetação da ilha é composta predominantemente por plantas herbáceas, que predominam no centro da ilha, enquanto que as margens possuem vegetação

arbórea (Figura 47). A vegetação arbórea das margens ocorre, principalmente, na parte mais a montante da ilha. Esse tipo de vegetação está associado aos diques marginais que formam a margem da ilha.

**Figura 47** - Vegetação da ilha Laranjeira.



Fonte: Imagem Google de 19/01/2016. A) notar barra vegetada que ocorre na cabeceira montante da ilha; B) foto mostrando a vegetação herbácea predominante na ilha. Ao fundo, vegetação arbórea próximo a margem da ilha.



O balanço hidráulico do trecho superior da ilha (entre a seção I1-1 e as seções I1-2 e I1-3) mostra que, na cheia, 33,718 m<sup>3</sup>/s de água são transferidos para a planície e para a ilha; valor que indica que 250,072 t/ano, em média, de sedimento suspenso são transferidos (considerando concentração média de 1,48 mg/L e 58 dias/ano em média que o rio permanece acima das margens plenas).

No trecho inferior da ilha (entre as seções I1-2 e I1-3 e a seção I1-4), esse mesmo balanço mostra que 47,946 m<sup>3</sup>/s de água são transferidos para a planície e para a ilha na cheia. Esse valor indica que 6,628 t/dia de sedimento suspenso são transferidos para planície e para a ilha; valor que corresponde a 384,424 t/ano em média (considerando concentração média de 1,60 mg/L e 58 dias/ano em média que o rio permanece acima das margens plenas).

De modo geral em todo o trecho, a composição da carga de fundo do rio Paraguai não se altera entre a cheia e a seca. Na cheia, a carga de fundo é composta principalmente de areia fina (58,12 %) a média (34,92 %), com pouco percentual de areia muito fina (6,05 %), quase nada de lama (0,26 %) e areia mais grossa (0,65%). Na seca, esses valores quase não se alteram, com a carga de fundo sendo composta predominantemente de areia fina (58,06 %), média (34,88 %) e muito fina (5,94 %), além de pouca lama (0,45 %) e areia mais grossa (0,68 %). Porém, as composições da carga de fundo se alteram bastante antes da bifurcação (I1-1), no braço esquerdo (I1-3) e depois da bifurcação (I1-4). Somente o braço direito (I1-2) não sofre muita alteração na composição de sua carga de fundo tendo, tanto na cheia (AG&MG: 0,56 %; AM: 63,89 %; AF: 34,08 %; AMF: 1,39 %; Lama: 0,08 %) como na seca (AG&MG: 2,39 %; AM: 64,26 %; AF: 27,87 %; AMF: 4,57%; Lama: 0,92 %), composição parecida.

Os dados de descarga sólida de leito (Tabela 16 [p.150] e Tabela 17 [p.151]) mostram que o trecho compreendido entre antes da bifurcação (I1-1) e após a bifurcação (I1-4) possui deposição de 103,568 t/dia na cheia. Na seca, esse valor sobe para 115,754 t/dia, indicando que mais de 40 mil toneladas por ano de sedimento de fundo são depositadas no trecho dos dois braços do rio. Os dados também mostram que cada braço apresenta dinâmica sedimentar particular.

Apesar de o braço esquerdo do canal (seção I1-3) apresentar maior velocidade média de fluxo (Tabela 15), o canal nesse braço transporta menos sedimento que o braço direito (seção I1-2). A velocidade de fluxo na seção no braço

esquerdo é, na seca, 7,5% maior que no braço direito. Na cheia, esse valor cai para 1,9%. Entretanto, o braço esquerdo (I1-3) transporta 31% menos sedimento de fundo na seca e 28% menos na cheia, em relação ao braço direito (Tabela 16 e Tabela 17).

A explicação para essa aparente incoerência é o fato de que a seção a montante dessas duas seções (antes da bifurcação – I1-1) apresenta maiores velocidades média de fluxo no seu lado direito (I1-1D). Se dividirmos a seção I1-1 ao meio, teremos o lado direito apresentando velocidade média do fluxo igual 0,709 m/s; vazão igual a 1.052,427 m<sup>3</sup>/s e área úmida de 1.449,91 m<sup>2</sup>, já que este lado do canal é 0,70 m mais raso que o lado esquerdo. Em contrapartida, o lado esquerdo dessa seção apresenta velocidade média de 0,653 m/s; vazão de 1.169,137 m<sup>3</sup>/s e área úmida de 1.771,94 m<sup>2</sup>. Por isso, o lado direito apresenta carga de fundo com maior calibre ( $D_{50} = 0,2604$  mm) em relação ao lado esquerdo, que apresenta carga de fundo com  $D_{50}$  igual a 0,1686 mm. Como o braço direito recebe carga de maior calibre, isso influencia no transporte de sedimento de fundo desse braço, visto que o transporte de sedimento é função tanto da velocidade do fluxo como do tamanho das partículas.

O braço direito, que recebe mais de 46 % da vazão, possui dinâmica sedimentar deposicional tanto na cheia (46,319 t/dia) quanto na seca (30,918 t/dia), seja em sua parte superior (35,769 t/dia) ou na inferior (41,468 t/dia). Na cheia, o trecho superior desse braço (entre as seções I1-1D e I1-2) deposita 23,506 t/dia. Na seca, esse trecho deposita 48,033 t/dia. Esses dados mostram que, em média, o trecho superior do braço direito acumula anualmente 13.055,867 toneladas de sedimento de fundo. Já o trecho inferior (entre as seções I1-2 e I1-4D) deposita 69,133 t/dia, na cheia, e 13,803 t/dia na seca, valores que correspondem a 15.135,820 toneladas anuais.

O braço direito tem, portanto, diminuição de sua competência e de sua capacidade. Os dados sedimentológicos mostram que, na cheia, o trecho superior do braço direito perde em torno de 8,35 % de sua capacidade, apesar de aumentar sua competência em 0,0128 mm. Já o seu trecho inferior tem uma pequena redução de sua competência (0,0026 mm) com redução ainda maior de sua capacidade (26,81 %). Na seca, essas modificações se tornam mais intensas, com o trecho

superior perdendo 49,09 % de sua capacidade e 0,0235 mm de sua competência. O trecho inferior perde 27,71 % de sua capacidade e 0,0988 mm de sua competência.

**Tabela 16** - Sedimentologia das seções levantadas no trecho ilha Laranjeira na cheia de 2014.

Seção	C <sub>ss</sub> <sup>1</sup> (mg/L)	C <sub>sd</sub> <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
I1-1E	1,33	13,0	0,1686	0,2054	134,348	1.313,175	125,217	1.572,740
I1-1D	1,00	14,0	0,2604	0,3888	90,930	1.273,016	281,322	1.645,268
I1-2	2,33	14,0	0,2732	0,3909	209,602	1.259,820	257,816	1.727,238
I1-3	1,25	14,0	0,1868	0,3382	123,803	1.386,598	185,814	1.696,215
I1-4E	1,00	14,0	0,1669	0,2026	125,150	1.752,102	114,288	1.991,540
I1-4D	1,83	14,0	0,2706	0,3971	109,319	836,321	188,683	1.134,323

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 46 e Figura 48.

O braço esquerdo, como um todo, possui dinâmica deposicional. Na cheia, esse braço apresenta taxa de deposição média de 5,464 t/dia. Na seca, o braço passa a ter com uma taxa de deposição média de 26,959 t/dia. Seu trecho superior (da seção I1-1E a seção I1-3) apresenta erosão de 60,597 t/dia na cheia, e deposição de 47 t/dia na seca, o que leva a uma taxa de erosão média de 2.481,452 toneladas anuais. Já o trecho inferior (da seção I1-3 a seção I1-4E) deposita 71,526 t/dia na cheia e 6,918t/dia na seca, o que leva a uma taxa de deposição média anual de 14.316,030 toneladas.

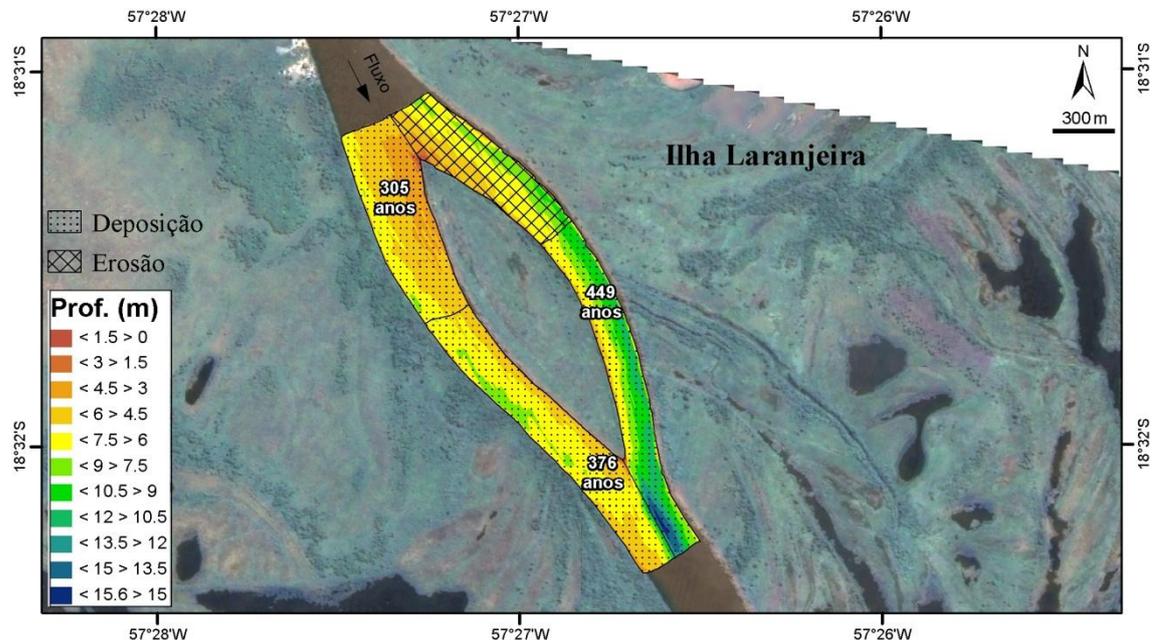
Portanto, o braço esquerdo tem, em seu trecho superior, na cheia, aumento da capacidade (48,39 %) e da competência (0,0182 mm). Na seca, ocorre uma inversão e o canal passa a perder, tanto capacidade (57,63 %) quanto competência (0,0863 mm). O trecho inferior desse braço, na cheia, perde capacidade (38,49 %) e competência (0,0199 mm). Na seca, esse trecho ganha competência (0,011 mm), mas perde capacidade (20,02 %).

**Tabela 17** - Sedimentologia das seções levantadas no trecho ilha Laranjeira na seca de 2015.

Seção	C <sub>ss</sub> <sup>1</sup> (mg/L)	C <sub>sd</sub> <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
I1-1E	20	10	0,2559	0,3852	1.139,832	569,916	81,549	1.791,297
I1-1D	20	10	0,2559	0,3852	909,488	454,744	97,839	1.462,071
I1-2	26	11	0,2794	0,3990	1.112,950	470,863	49,806	1.633,619
I1-3	16	9	0,1696	0,2070	940,379	528,963	34,549	1.503,891
I1-4E	26	10	0,1806	0,2908	2.072,374	797,067	27,631	2.897,072
I1-4D	26	10	0,1806	0,2908	565,515	217,506	36,003	819,024

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 46 e Figura 48.

Os dados hidrossedimentares levantados mostram que o braço direito possui regime deposicional mais intenso que o braço esquerdo e que a evolução da ilha, provavelmente, se encaminhará para a anexação desta à planície por meio do assoreamento do braço direito. Com as taxas de sedimentação calculadas e a batimetria do rio, foi possível estimar o tempo que essa anexação ocorrerá (Figura 49).

**Figura 49** - Regime morfodinâmico e estimativa de preenchimento do canal na ilha Laranjeira, de acordo com as taxas de deposição e com a capacidade (toneladas) do canal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os anos calculados nesse mapa indicam o tempo necessário para o preenchimento total do canal de acordo com as taxas de sedimentação calculadas. Esse mapa indica que, com as atuais taxas de deposição, o primeiro local a ser

preenchido seria o trecho superior do braço direito, seguido pelo seu trecho inferior. O trecho inferior do braço esquerdo, que também possui regime deposicional, ao contrário de seu trecho superior, só seria preenchido 73 anos após o preenchimento de todo o braço direito. No entanto, é importante salientar que as mudanças na morfologia do canal acarretam mudanças na hidrossedimentologia deste e, sendo assim, esse esquema evolutivo é muito simplificado. Apesar de os cálculos indicarem que o trecho inferior do braço esquerdo será assoreado, isso não deve ocorrer, visto que o preenchimento do braço direito deve alterar a hidrodinâmica do rio. Logo, este esquema indica uma possível evolução da morfodinâmica do trecho da ilha Laranjeira, que, provavelmente, será anexada à planície daqui no mínimo 375 anos, passando o rio a fluir em canal único através de seu atual braço esquerdo.

### 8.2.2. *Trecho Ilha Limoeiro*

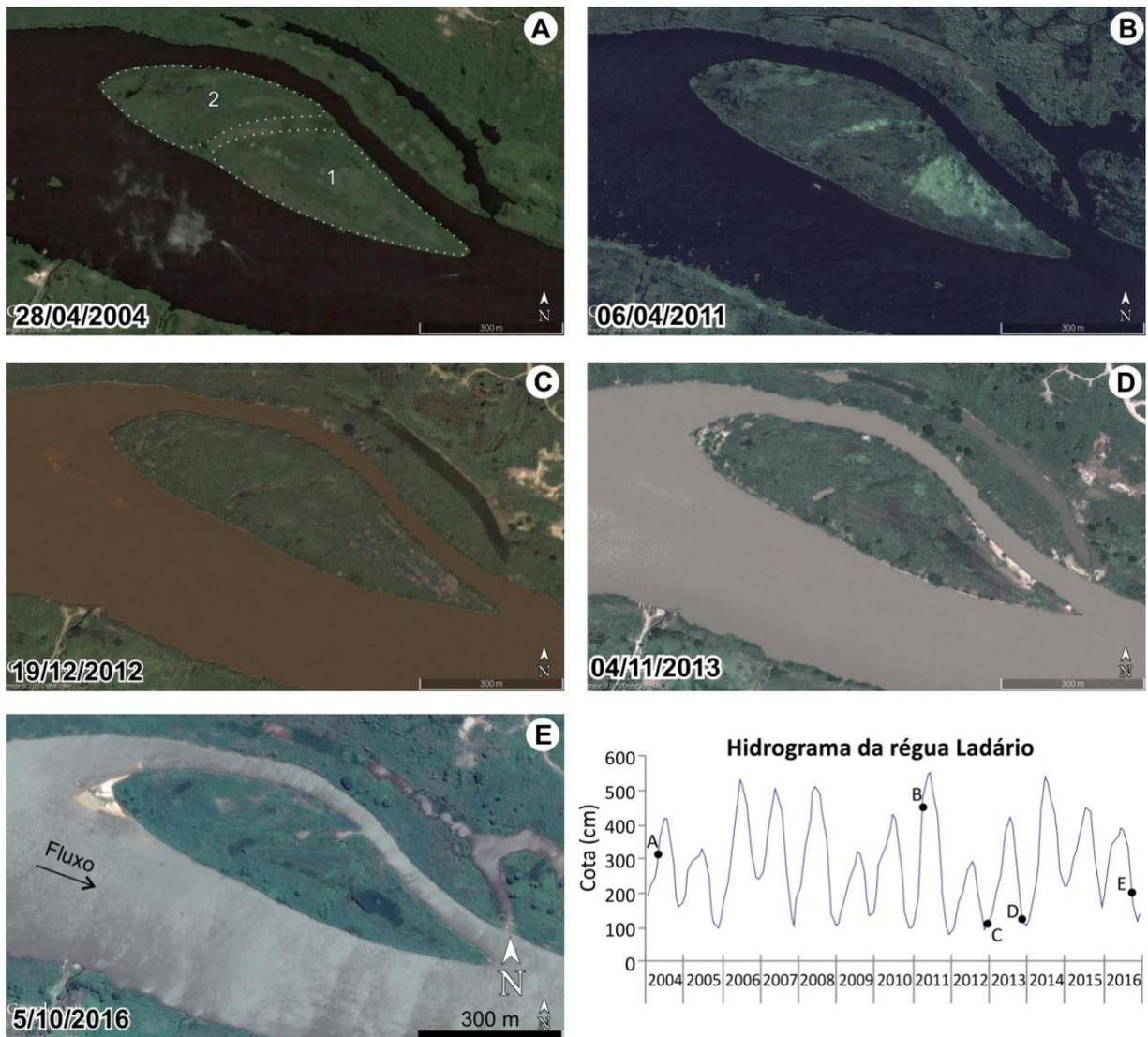
O trecho ilha Limoeiro situa-se em frente à cidade de Corumbá-MS, distando 1,4 km a jusante do porto geral, na altura aproximada do Forte Junqueira no destacamento do Exército. A ilha possui forma de gota com parte montante arredondada e jusante afinada. O eixo maior possui 894 m e o menor 225 m. Seu perímetro é de 1889 m e possui área de 0,14 km<sup>2</sup>. A vegetação da ilha é composta predominantemente por plantas herbáceas, com pouca vegetação arbórea.

As características morfológicas desta ilha revelam que esta é, assim como a ilha Laranjeira, uma típica ilha de barra central composta. Imagens orbitais indicam que essa ilha é formada pela acreção de pelo menos duas barras. Marcas de um paleocanal que corta a ilha na direção ENE/OSO, dividiria esta ilha em duas partes (Figura 50). Seu crescimento, aparentemente, ocorreu de jusante para montante (ESE–ONO). Imagem mais recente (Figura 50E) e de período seco, mostra que depósitos se formam na cabeceira montante da ilha. Outra imagem, também de período seco (Figura 50C), revela que barra arenosa também está se depositando 100 metros a oeste da cabeceira montante da ilha. Nos períodos de cheia (Figura 50A,B), esses depósitos ficam ocultados pelo rio Paraguai que os recobrem.

As informações obtidas por meio das imagens orbitais (Figura 50) coincidem com as obtidas por meio do levantamento batimétrico do rio Paraguai na ilha (Figura 51). A batimetria do rio Paraguai, nesta localidade, evidencia que é na cabeceira montante da ilha que o rio possui as menores profundidades, indicando que o

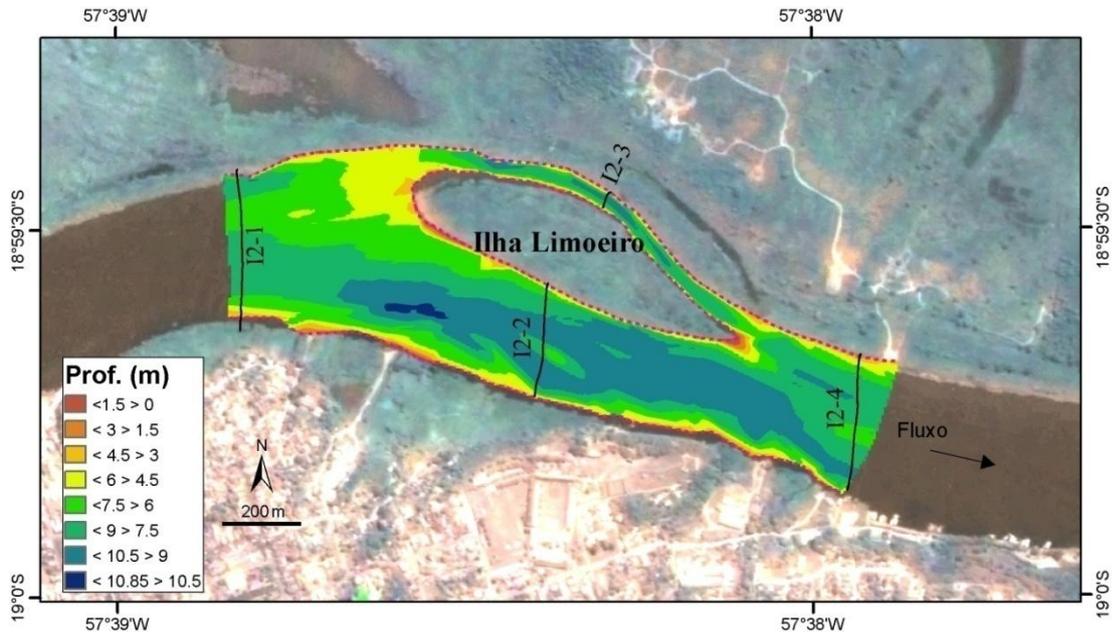
crescimento da ilha está ocorrendo para montante. Levantamento batimétrico realizado na cheia de 2014 mostra que o rio Paraguai, em todo o trecho da ilha, apresenta profundidade média de 7,62 m e máxima de 10,85 m. Na seca esses valores diminuem para 5,07 m e 8,30 m, respectivamente.

**Figura 50** - Ilha Limoeiro em diferentes períodos e condições hidrológicas.



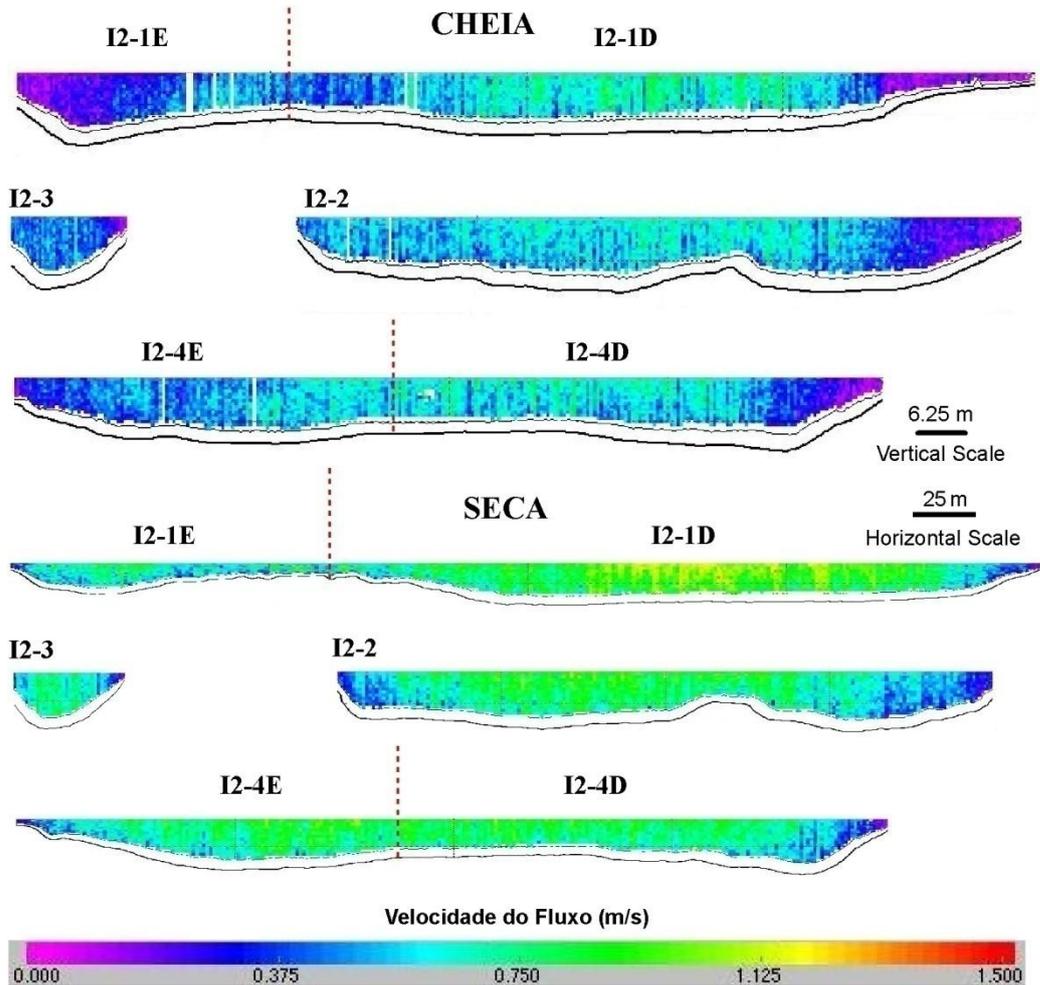
Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Google Earth. Hidrograma: Hidroweb-ANA.

**Figura 51** - Batimetria e localização das seções ADCP levantadas no trecho da ilha Limoeiro.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Landsat TM5 fundida a imagem CBERS-HRC.

**Figura 52** - Seções ADCP levantadas no trecho da ilha Limoeiro.



Fonte: Elaborado pelo autor. Ver Figura 51 para localização.

Antes de se bifurcar (I2-1), o rio Paraguai apresenta a maior largura de canal e a menor profundidade média (Tabela 18). Nessa altura, o rio apresenta, na cheia, a segunda menor velocidade média de fluxo. Na seca, este apresenta um incremento significativo da velocidade de fluxo (71,26 %). Esse aumento de velocidade de fluxo é o que compensa a diminuição na área úmida (48,97 %), permitindo que a vazão, mesmo na seca, seja um pouco maior que na cheia (1,03 %).

As características sedimentares dessa localidade mostram que a carga de fundo é composta por mais de 97 % de areia, com um pouco mais de 2 % de silte e argila. Na cheia, a carga de fundo é composta por areia fina (51,19 %) e muito fina (42,24 %) com uma pequena porcentagem de areia média (3,61 %). Na seca, a carga de fundo se torna mais grossa com aumento de areia média (9,01 %) e areia fina (74,44 %) e diminuição de areia muito fina (13,35 %).

O braço direito (I2-2) apresenta a maior profundidade média (Tabela 18), que na cheia possui a maior velocidade média de fluxo (Tabela 18). Nesse braço são encontradas as maiores profundidades 250 m a montante da seção I2-2 (Figura 51). Na cheia, esse braço possui 89 % da vazão do rio Paraguai. Na seca, esse valor cai para 86 %. Esse braço apresenta carga de fundo composta de material mais grosso que os demais (Tabela 19 e Tabela 20). Na cheia, a carga de fundo é composta principalmente por areia fina (86,07 %), com pequena quantidade de areia muito fina (8,59 %) e média (4,71 %). Na seca, a carga de fundo se torna mais grossa com o aumento da quantidade de areia média (17,50 %) e, como resultado, diminuição da areia fina (78,43 %) e muito fina (3,45 %).

O braço esquerdo (I2-3) possui as menores velocidades médias de fluxo e a segunda maior profundidade média (Tabela 18). Na cheia, esse braço possui 11 % da vazão do rio. Na seca esse valor sobe para 14 %. A carga de fundo desse braço é composta principalmente por areia muito fina (54,62 %) com maior presença de lama (8,09 %) que nas demais seções.

**Tabela 18** - Dados hidráulicos das seções levantadas no trecho da ilha Limoeiro.

Seção	Vazão (m³/s)	Veloc. média (m/s)	Larg. (m)	Prof. Média (m)	Área úmida (m²)	Temp. água (°C)	Data
I2-1E	261,205	0,300	110,73	7,70	864,00	24,4	Ago-14
I2-1D	996,922	0,484	298,44	6,81	2.054,36	24,4	Ago-14
I2-2	1.121,314	0,445	320,46	8,41	2.600,56	24,4	Ago-14
I2-3	141,045	0,373	48,93	7,94	385,29	24,4	Ago-14
I2-4E	545,471	0,438	154,17	7,75	1.221,82	24,4	Ago-14
I2-4D	715,567	0,454	204,42	7,91	1.568,15	24,4	Ago-14
I2-1E	218,862	0,537	161,23	2,99	384,377	28,7	Nov-15
I2-1D	1.062,198	0,785	328,11	4,75	1.339,87	28,7	Nov-15
I2-2	1.092,454	0,613	283,26	6,58	1.805,73	28,8	Nov-15
I2-3	155,469	0,582	48,12	5,50	268,45	28,6	Nov-15
I2-4E	578,667	0,669	176,06	5,22	838,87	28,5	Nov-15
I2-4D	713,899	0,642	215,01	5,56	1.091,95	28,5	Nov-15

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 51 e Figura 52.

Após a bifurcação do rio (I2-4), a vazão medida ficou, na cheia, um pouco abaixo (0,56 %) do valor antes da bifurcação. Isto era esperado uma vez que o rio perde água tanto para a planície como para a ilha. No entanto, essa redução é muito pequena e pode ser devido à imprecisão na medição do equipamento (ADCP). Na seca, a vazão após a bifurcação é levemente maior (0,49 %) do que antes da bifurcação, o que é esperado, já que o rio não está perdendo água. Na cheia, a carga de fundo do rio nesta localidade é composta predominantemente de areia fina (86,98 %), com um pouco de areia muito fina (10,28 %) e média (2,43 %). Na seca, a carga de fundo se torna mais grossa, com leve diminuição da areia fina (84,69 %) e aumento de areia média (8,68 %). Outra constatação importante diz respeito à quantidade de lama presente na carga de fundo do rio após a bifurcação, que perde em média 2,33 % de lama que existia antes da bifurcação.

**Tabela 19** - Sedimentologia das seções levantadas na ilha Limoeiro na cheia de 2014.

Seção	C <sub>ss</sub> <sup>1</sup> (mg/L)	C <sub>sd</sub> <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
I2-1E	2,00	16	0,1261	0,1609	45,136	361,090	0,000	406,226
I2-1D	2,00	16	0,1261	0,1609	172,268	1.378,145	8,298	1.558,711
I2-2	2,33	16	0,1731	0,2081	225,734	1.550,104	5,291	1.781,129
I2-3	1,17	13	0,1145	0,1439	14,258	158,422	0,002	172,682
I2-4E	1,33	14	0,1701	0,2051	62,681	659,802	2,261	724,744
I2-4D	1,33	14	0,1701	0,2051	82,227	865,550	4,377	952,154

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 51 e Figura 52.

**Tabela 20** - Sedimentologia das seções levantadas na ilha Limoeiro na seca de 2015.

Seção	Css <sup>1</sup> (mg/L)	Csd <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
I2-1E	24	10	0,1695	0,2411	453,832	189,097	32,084	675,013
I2-1D	24	10	0,1695	0,2411	2.202,574	917,739	491,923	3.612,236
I2-2	22	10	0,1845	0,3075	2.076,537	943,880	113,487	3.133,904
I2-3	21	11	0,1150	0,1441	282,083	147,758	6,918	436,759
I2-4E	17	11	0,1770	0,2216	849,946	549,965	101,132	1.501,043
I2-4D	17	11	0,1770	0,2216	1.048,575	678,490	96,391	1.823,456

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 51 e Figura 52.

A carga de fundo do rio Paraguai na ilha Limoeiro, na cheia, é composta, em geral, principalmente por areia fina (65,38 %) e muito fina (28,93 %), além de uma pequena quantidade de areia média (2,69 %). Na seca, a granulometria da carga de fundo fica um pouco mais grossa, com aumento do percentual de areia fina (68,71 %) e diminuição do percentual de areia muito fina (19,43 %), além de aumento de areia média (8,80 %). A velocidade média do fluxo também aumenta consideravelmente na seca (52,75 %).

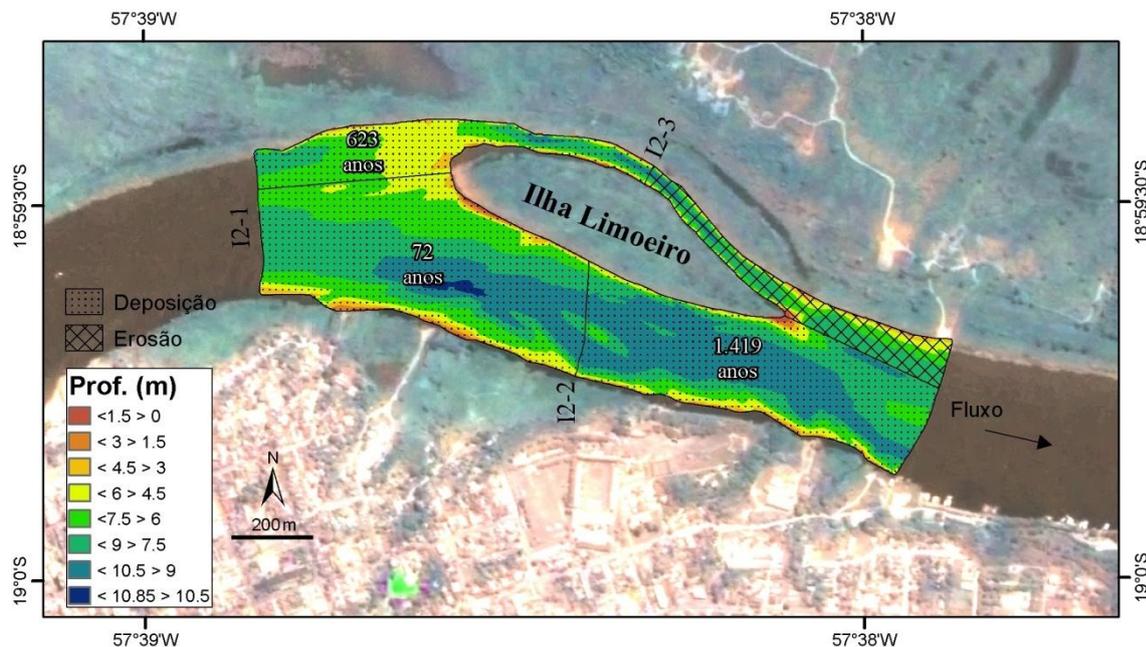
A carga sedimentar suspensa do rio Paraguai na ilha Limoeiro varia consideravelmente entre o período de cheia e seca, conforme foi mostrado no capítulo anterior. Ademais, os dados de carga suspensa (Tabela 19 e Tabela 20) mostram que parte dessa carga está sendo depositada tanto na ilha (na cheia) como nos dois braços (Seca: 757,885 t/dia; Cheia: 72,496 t/dia), pois a concentração diminui entre as seções antes e depois da bifurcação (I2-1 e I2-4). Acredita-se, entretanto, que a maior parte desse sedimento é depositada no braço esquerdo, que apresenta carga de fundo fina (areia muito fina e lama) e baixa velocidade de fluxo.

Os dados de descarga sólida de leito (Tabela 19 e Tabela 20) mostram que na cheia ocorre pequena deposição no lado direito da cabeceira da ilha (3,007 t/dia – seção I2-1D e I2-2). O braço esquerdo (entre as seções I2-1E e I2-3) praticamente não está recebendo e nem perdendo material de fundo, pois o balanço de massa nesse braço é de apenas 0,002 t/dia de erosão, na cheia. Na seca, o trecho superior do braço direito apresenta taxa de deposição de 378,436 t/dia. O braço esquerdo, na seca, possui taxa de deposição de 12,584 t/dia. Esses valores mostram que 69.613,347 t/ano de areia são depositados em média no trecho superior do braço direito e que 2.296,215 t/ano são depositados no trecho superior do braço esquerdo.

Na parte inferior do braço direito (entre as seções I2-2 e I2-4D) o rio sofre deposição, na cheia, de 0,914 t/dia. Na seca, a deposição aumenta para 17,096 t/dia, o que dá uma taxa média anual de 3.286,825 toneladas de deposição. O braço esquerdo, em sua parte inferior, apresenta dinâmica erosiva tanto na cheia (2,259 t/dia) quanto na seca (94,214 t/dia), o que leva a uma taxa de erosão média anual de 17.606,322 toneladas.

Com base nas taxas sedimentares calculadas para as seções levantadas no trecho ilha Limoeiro e no volume do canal, um mapa da morfodinâmica do trecho foi elaborado (Figura 53). Esse mapa, assim como o da ilha Laranjeira, indica o tempo estimado para o total preenchimento de cada trecho do canal. De acordo com esses cálculos, um rápido assoreamento ocorreria no braço principal (direito), o que parece algo estranho se observado a batimetria do canal, a qual indica que esse braço apresenta as maiores profundidades, sendo este, portanto, um trecho erosivo. Dessa forma, a lógica utilizada para se compor este mesmo mapa na ilha Laranjeira não pode ser aplicada na ilha Limoeiro, visto que a dinâmica nessa ilha parece bastante diferente.

**Figura 53** - Morfodinâmica e tempo para preenchimento do canal da ilha Limoeiro de acordo com as taxas deposicionais calculadas.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Landsat TM5 fundida a imagem CBERS-HRC.

Percebeu-se que se analisado o trecho superior e o inferior, sem dividir as seções, tem-se uma dinâmica sedimentar mais plausível. Assim, o trecho superior

(da seção I2-1 às seções I2-2 e I2-3) apresenta regime deposicional tanto na cheia (3,005 t/dia) como na seca (403,602 t/dia); e o trecho inferior (das seções I2-2 e I2-3 à seções I2-4) apresenta regime erosivo tanto na cheia (1,345 t/dia) como na seca (77,118 t/dia).

Esses valores indicam que o trecho superior apresenta regime deposicional de 74.205,777 t/ano, e o trecho inferior apresenta regime erosivo de 14.319,497 t/ano. Toda essa deposição no trecho superior acarretaria no completo assoreamento do canal em apenas 87 anos. Conforme o mapa batimétrico, sabe-se que provavelmente toda essa carga sedimentar deve estar se depositando apenas na cabeceira montante da ilha, conduzindo ao fechamento do braço esquerdo. O mesmo cálculo realizado apenas para a área em frente à cabeceira montante da ilha indica que a esta cresceria e fecharia o braço esquerdo em apenas 34 anos. No entanto, esse tempo deve ser maior, visto que, à medida que a morfologia do canal evolui e as profundidades ficam menores, as taxas de deposição tendem a diminuir.

Portanto, os dados hidrossedimentares indicam que a evolução da ilha Limoeiro levaria a sua anexação à planície na margem esquerda do rio Paraguai, algo que parece já ter ocorrido anteriormente neste local, conforme pode ser observado nas imagens de satélite da ilha (Figura 50).

Outra análise importante refere-se ao braço esquerdo, o qual apresenta carga de fundo um pouco lamosa. A análise das cargas sedimentares das seções indica que a carga suspensa do rio Paraguai estaria sendo depositada, principalmente, no braço esquerdo da ilha. Entretanto, as velocidades de fluxo nesse canal não indicam isso. Mesmo na cheia, momento em que as velocidades de fluxo diminuem neste trecho do rio por conta do remanso existente, a velocidade de fluxo do braço esquerdo é de 0,373 m/s. Esta velocidade é o suficiente para transportar o sedimento fino em suspensão, não ocorrendo a deposição de sedimento (diagrama de *Hjulström* apud [DINGMAN, 2009, p.485-486](#)). Como quase toda a areia transportada pelo fundo do canal fica retida na cabeceira montante da ilha, o braço esquerdo recebe menos areia e sofre erosão, o que é corroborado pela profundidade deste canal. Em consequência, o braço esquerdo, tanto em sua parte superior como inferior, teria regime erosivo. Esse regime erosivo deve cessar à medida que a ilha Limoeiro evolua e seja anexada à planície. Esse processo levará ao isolamento do braço esquerdo, que terá características muito parecidas com os

canais de ressaco existentes nas ilhas do rio Paraná (LELI, 2015). A partir desse ponto, o braço esquerdo passará a ter regime deposicional, em que a carga suspensa, que conseguir ultrapassar a barreira da cabeceira da ilha, será depositada nesse braço, levando a total anexação da ilha à planície.

### 8.2.3. Trecho Ilhas do Formigueiro

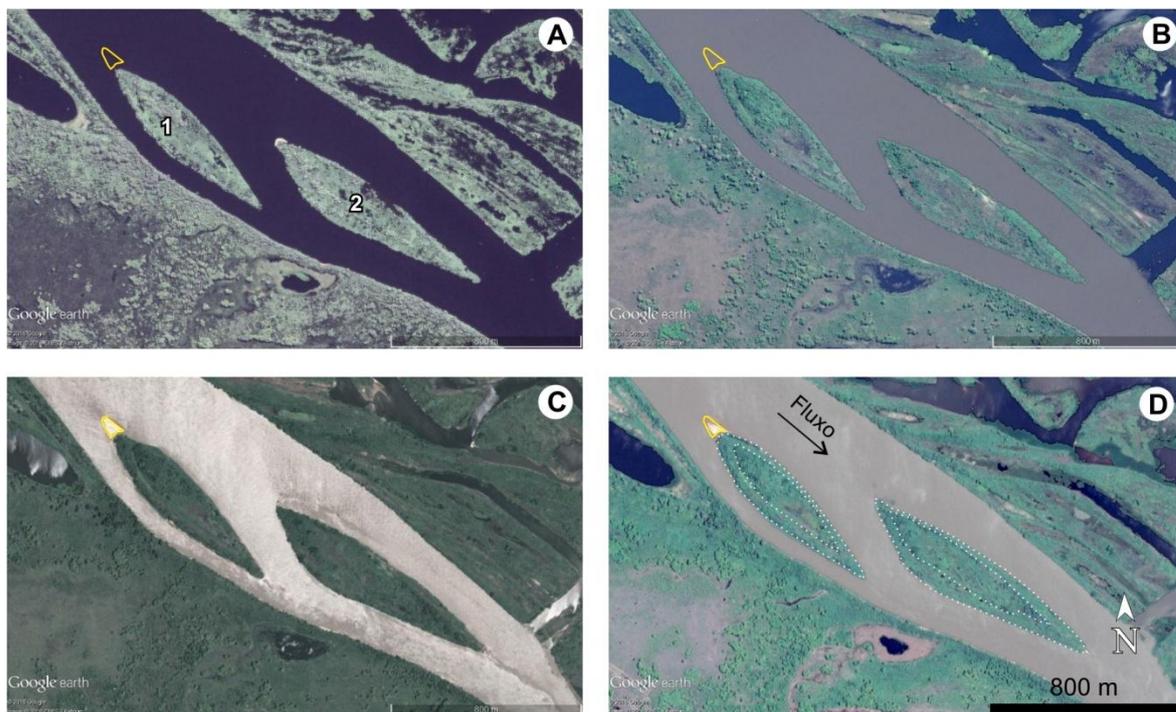
As ilhas do Formigueiro formam um arquipélago constituído de duas ilhas (Figura 54) que distam 38 km a jusante do porto geral de Corumbá. Ambas as ilhas apresentam forma elíptica com a ponta jusante mais alongada que a ponta montante. A ilha 1 possui forma mais regular que a ilha 2 e seus eixos medem aproximadamente 839 m e 192 m. Seu perímetro mede 1.823 m e sua área corresponde a 0,12 km<sup>2</sup>. A ilha 2 possui 0,16 km<sup>2</sup> de área e 2.258 m de perímetro. Seus eixos medem aproximadamente 1.082 m e 227 m.

As características morfológicas dessas ilhas mostram que elas também são ilhas de barras centrais compostas. A origem e evolução das ilhas parecem ser condicionadas pela formação de um depósito no centro de cada ilha. As ilhas parecem ter evoluído pelo crescimento concêntrico do depósito central (Figura 54D), semelhantemente ao que deve ter ocorrido na ilha Laranjeira. Importante destacar que, assim como na ilha Laranjeira, mais estudos devem ser desenvolvidos sobre essas morfologias com vista à elucidação de sua origem e evolução.

A ilha 1 é composta de 38,95 % de vegetação arbórea, vegetação esta situada principalmente na margem direita (oeste) e na cabeceira montante da ilha (Figura 55). A ilha 2 possui 13,52 % de sua área ocupada com vegetação arbórea, localizada principalmente na cabeceira montante.

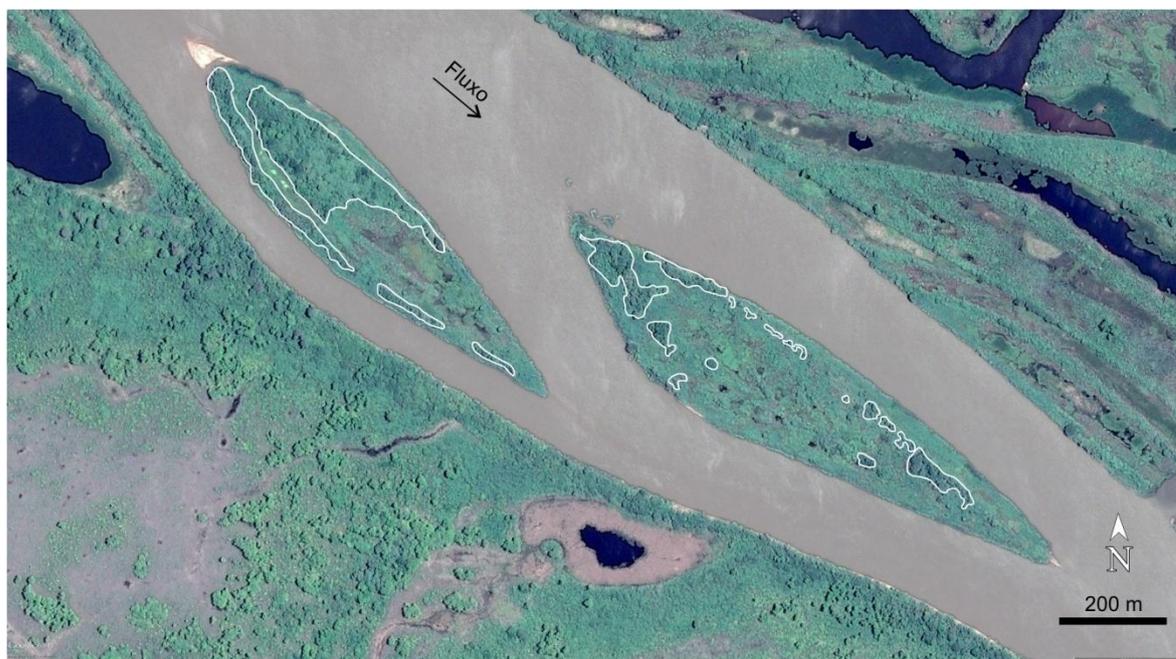
Depósitos de barra arenosa se formam na cabeceira montante da ilha 1 (Figura 54 a Figura 56). Apesar de não ter sido visualizado na campanha de campo realizada na seca de 2015, a ilha 2 também apresenta depósitos em sua cabeceira montante e que se encontram vegetados (Figura 55).

**Figura 54** - Imagens orbitais das ilhas do Formigueiro.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagens Google: A) 16/06/2008; B) 26/09/2013; C) 04/11/2013; D) 05/10/2016. Área em amarelo indica barra arenosa em formação (ver Figura 55 e Figura 56).

**Figura 55** - Vegetação arbórea (polígonos brancos) das ilhas Formigueiro.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem Google de 05/10/2016.

**Figura 56** - Barra arenosa na cabeceira montante da ilha 1 do arquipélago do Formigueiro.



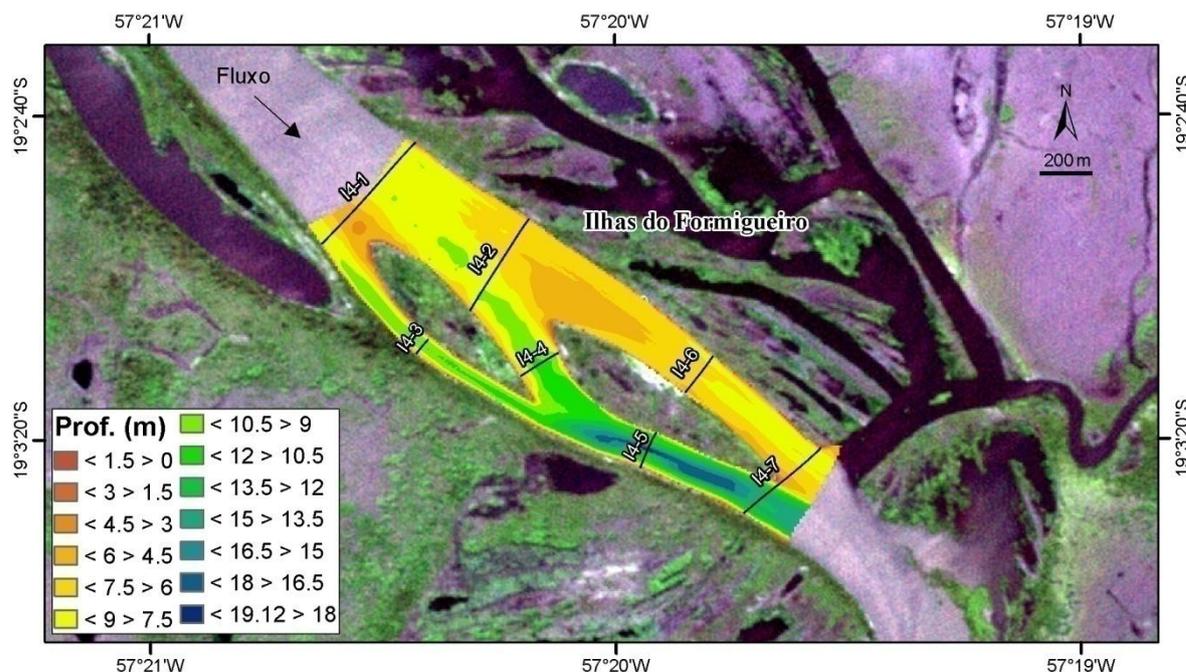
Fonte: Hudson de Azevedo (06/11/15).

As profundidades mapeadas no rio Paraguai neste trecho (Figura 57) corroboram as informações obtidas nas imagens orbitais. Em todo trecho mapeado das ilhas, a profundidade média foi de 8,25 m, com máxima de 19,12 m. Os locais de menor profundidade são as duas cabeceiras montantes das ilhas. No caso da ilha 2, esse depósito encontra-se deslocado para o canal esquerdo (entre as seções I4-2E e I4-6). As menores profundidades estão na cabeceira montante da ilha 1. O segundo local com menor profundidade é o braço entre as seções I4-2E e I4-6. O local de maior profundidade é o braço direito da ilha 2 (I4-5), que também apresenta as maiores velocidades de fluxo (Figura 58 [p.164] e Tabela 21 [p.165]).

A ilha 1 bifurca o rio Paraguai em dois braços (I4-2 e I4-3). Antes de se bifurcar (I4-1) o canal apresenta a maior largura e a terceira menor profundidade. O braço esquerdo (I4-2) é mais largo e mais raso que o braço direito (I4-3). Na cheia, mais de 80 % da vazão do rio passa pelo braço esquerdo dessa ilha. Na seca, esse valor cai para quase 78 %. Além de menos água, o braço direito da ilha 1 também transporta menos sedimento. Na cheia, esse braço transporta quase 80 % menos

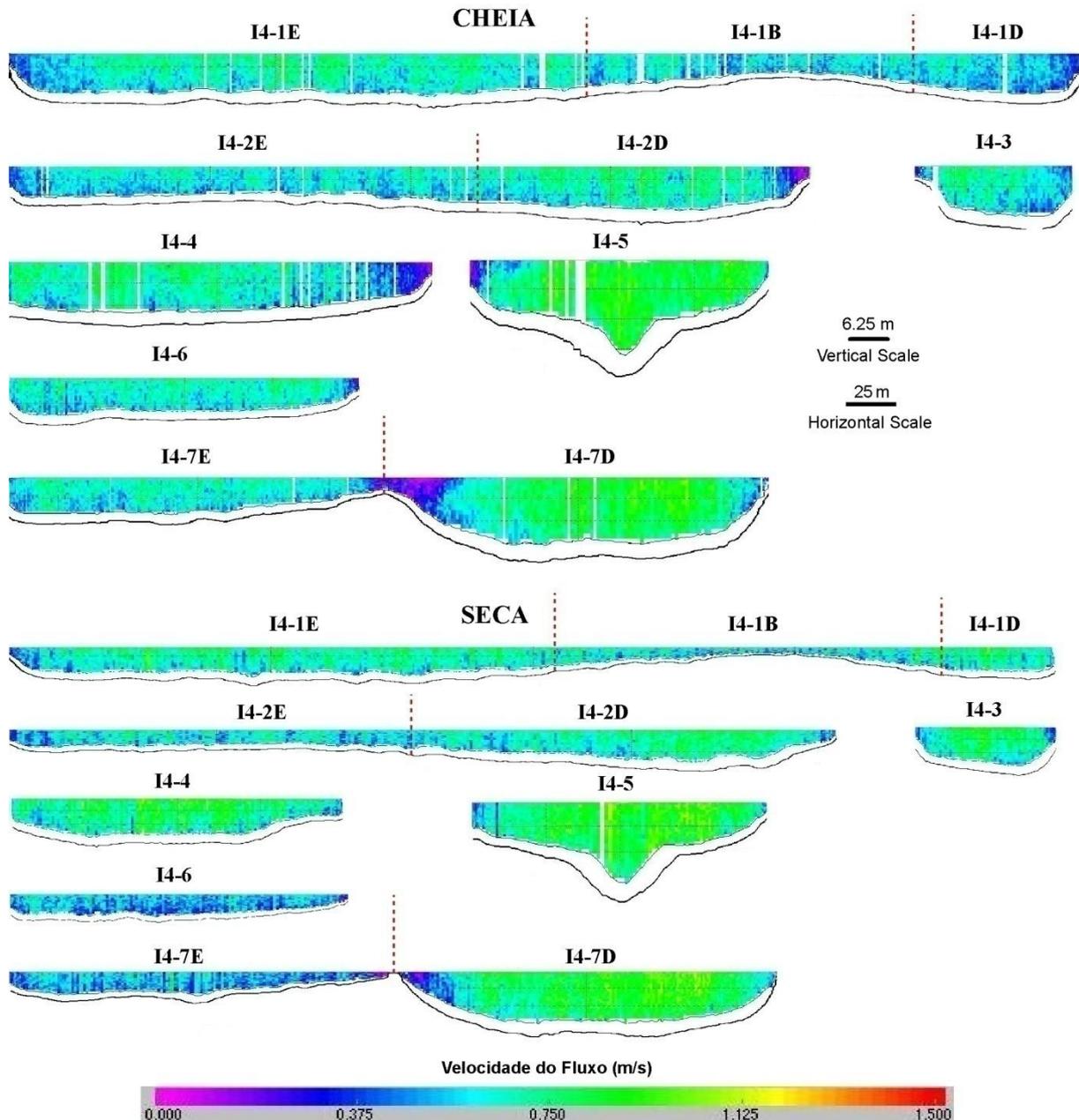
sedimentos (total) que o braço esquerdo. Na seca, esse valor cai para quase 76 %. Com relação ao sedimento suspenso, o braço esquerdo, na cheia, transporta 89,51 % mais sedimento que o braço direito. Na seca esse valor cai para 77,28 %.

**Figura 57** - Batimetria e localização das seções realizadas nas ilhas do Formigueiro.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem RapidEye.

O sedimento de fundo é o que mais destoa entre esses dois braços, já que o esquerdo, na cheia, transporta 96,37 % mais sedimento que o braço direito. Na seca, essa diferença cai para 93,03 %. A composição da carga de fundo dos dois braços da ilha 1 é também bastante diferente. O braço esquerdo é composto principalmente de areia (99,02 %) com pouca presença de lama (0,90 %). Em oposição, o braço direito é composto de lama (80,51 %) um pouco arenosa (19,49 %).

**Figura 58** - Seções ADCP levantadas nas ilhas do Formigueiro.

Fonte: Elaborado pelo autor. Ver Figura 57 para localização.

Na cheia, a carga de fundo do braço esquerdo é composta de areia fina (71,03 %) a muito fina (18,01 %) com pouca presença de areia média (9,07 %) e lama (1,43 %) e quase nenhuma areia grossa (0,22 %), muito grossa (0,09 %) e cascalho (0,15 %). Na seca, a carga de fundo desse braço se torna um pouco mais grossa (Tabela 22 e Tabela 23) com maior percentagem de areia fina (83,65 %) e diminuição da areia muito fina (8,29 %) e lama (0,36 %). Já o braço direito apresenta, na cheia, carga de fundo lamosa (84,04%) com um pouco de areia fina (9,74 %) a muito fina (4,90 %) e quase nada de areia média (0,37 %), grossa (0,44

%) e muito grossa (0,50 %). Na seca, a carga de fundo desse braço se torna um pouco mais arenosa (23,03 %) com aumento da porcentagem de areia fina (13,14 %) e muito fina (9,79 %), e conseqüentemente, diminuição da quantidade de lama (76,97 %).

**Tabela 21** - Dados hidráulicos das seções levantadas nas ilhas do Formigueiro.

Seção	Vazão (m³/s)	Veloc. média (m/s)	Larg. (m)	Prof. Média (m)	Área úmida (m²)	Temp. água (°C)	Data
I4-1E	1.390,161	0,594	288,64	8,19	2.320,89	24,8	Ago-14
I4-1B	570,287	0,534	181,35	5,77	1.043,13	24,8	Ago-14
I4-1D	266,726	0,480	70,43	8,01	543,12	24,8	Ago-14
I4-2E	844,579	0,547	236,53	6,56	1.533,14	24,8	Ago-14
I4-2D	928,718	0,599	191,83	8,20	1.530,10	24,8	Ago-14
I4-3	410,220	0,564	87,55	8,45	723,42	24,8	Ago-14
I4-4	947,254	0,474	263,52	9,15	2.415,02	24,9	Ago-14
I4-5	1.373,873	0,728	157,97	11,72	1.876,53	24,9	Ago-14
I4-6	715,915	0,583	181,38	6,84	1.225,45	24,8	Ago-14
I4-7E	715,058	0,566	187,33	6,86	1.257,25	24,8	Ago-14
I4-7D	1.389,057	0,658	184,33	11,00	2.094,28	24,8	Ago-14
I4-1E	923,871	0,616	267,28	5,56	1.475,19	28,2	Nov-15
I4-1B	339,238	0,564	198,43	2,94	574,92	28,2	Nov-15
I4-1D	199,976	0,609	64,94	5,19	314,28	28,2	Nov-15
I4-2E	436,854	0,524	220,85	3,80	826,59	29,0	Nov-15
I4-2D	687,426	0,607	196,26	5,69	1.120,50	29,0	Nov-15
I4-3	322,604	0,629	80,06	6,78	504,15	28,2	Nov-15
I4-4	763,070	0,676	172,56	6,64	1.129,55	28,4	Nov-15
I4-5	1.109,462	0,756	155,38	9,17	1.474,34	28,5	Nov-15
I4-6	329,793	0,462	182,23	4,11	712,26	29,0	Nov-15
I4-7E	347,210	0,466	194,57	3,96	746,88	29,1	Nov-15
I4-7D	1.111,105	0,658	189,74	8,61	1.680,65	29,1	Nov-15

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 57 e Figura 58.

Outra constatação interessante da ilha 1 diz respeito à quantidade de água transferida para a planície e para a própria ilha. Na cheia, a soma das vazões dos dois braços é 1,28 % menor que a vazão do rio antes de se bifurcar. O mesmo não ocorre na seca, já que a soma dos dois braços é 0,32 % maior que a vazão do rio antes da bifurcação. Os valores de vazão medidos na cheia indicam que aproximadamente 28 m³/s de água são transferidos para a planície e para a ilha 1. Esse valor indica que aproximadamente 280 t/ano de sedimento suspenso são transferidos para a planície e para a ilha 1 (considerando concentração média de 2

mg/L e 58 dias por ano em que o rio está acima das margens plenas, conforme dados do capítulo anterior).

Os dados de descarga sólida de leito antes da bifurcação em frente a barra em formação da ilha 1 mostram que a cabeceira montante dessa ilha sofre deposição de 31,896 t/dia na cheia e 47,544 t/dia na seca (valores calculados pela subdivisão da seção, conforme Figura 58). Esses valores indicam que nessa cabeceira são depositados em média 39,720 t/dias de areia anualmente, o que leva a um total de 14.497,8 t/ano. Como a barra que está se formando nessa cabeceira possui 237.419,65 toneladas (Figura 59 e Tabela 24), esta deve possuir idade em torno de 16 anos e sua formação se iniciou por volta do ano de 1998.

**Tabela 22** - Sedimentologia das seções levantadas no trecho das ilhas do Formigueiro na cheia de 2014.

Seção	C <sub>ss</sub> <sup>1</sup> (mg/L)	C <sub>sd</sub> <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
I4-1E	1,50	15	0,1888	0,3483	285,075	2.850,746	79,726	3.215,547
I4-1B	1,50	15	0,1888	0,3483	73,909	739,092	31,896	844,897
I4-1D	1,50	15	0,1888	0,3483	34,568	345,677	4,544	384,789
I4-2E	1,83	15	0,1646	0,2333	133,538	1.094,574	35,071	1.263,183
I4-2D	1,83	15	0,1646	0,2333	146,841	1.203,619	44,228	1.394,688
I4-3	0,83	14	0,0141	0,1319	29,418	496,202	3,047	528,667
I4-4	1,83	14	0,1535	0,2000	149,772	1.145,798	8,719	1.304,289
I4-5	2,00	15	0,1616	0,2031	237,405	1.780,539	96,527	2.114,471
I4-6	2,50	15	0,2572	0,3880	154,638	927,826	53,996	1.136,460
I4-7E	1,83	14	0,1698	0,2041	113,059	864,934	31,829	1.009,822
I4-7D	1,83	14	0,1698	0,2041	219,627	1.680,203	62,839	1.962,669

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 57 e Figura 58.

Além da barra na cabeceira montante da ilha 1, o trecho superior do braço direito dessa ilha (entre as seções I4-3 e a margem direita da seção I4-1) também possui regime sedimentar deposicional, com taxas de 1,497 t/dia de sedimentação na cheia e 12,066 t/dia na seca. Essas taxas indicam um regime deposicional médio de 2.475,247 t/ano nesse trecho.

**Tabela 23** - Sedimentologia das seções levantadas no trecho das ilhas do Formigueiro na seca de 2015.

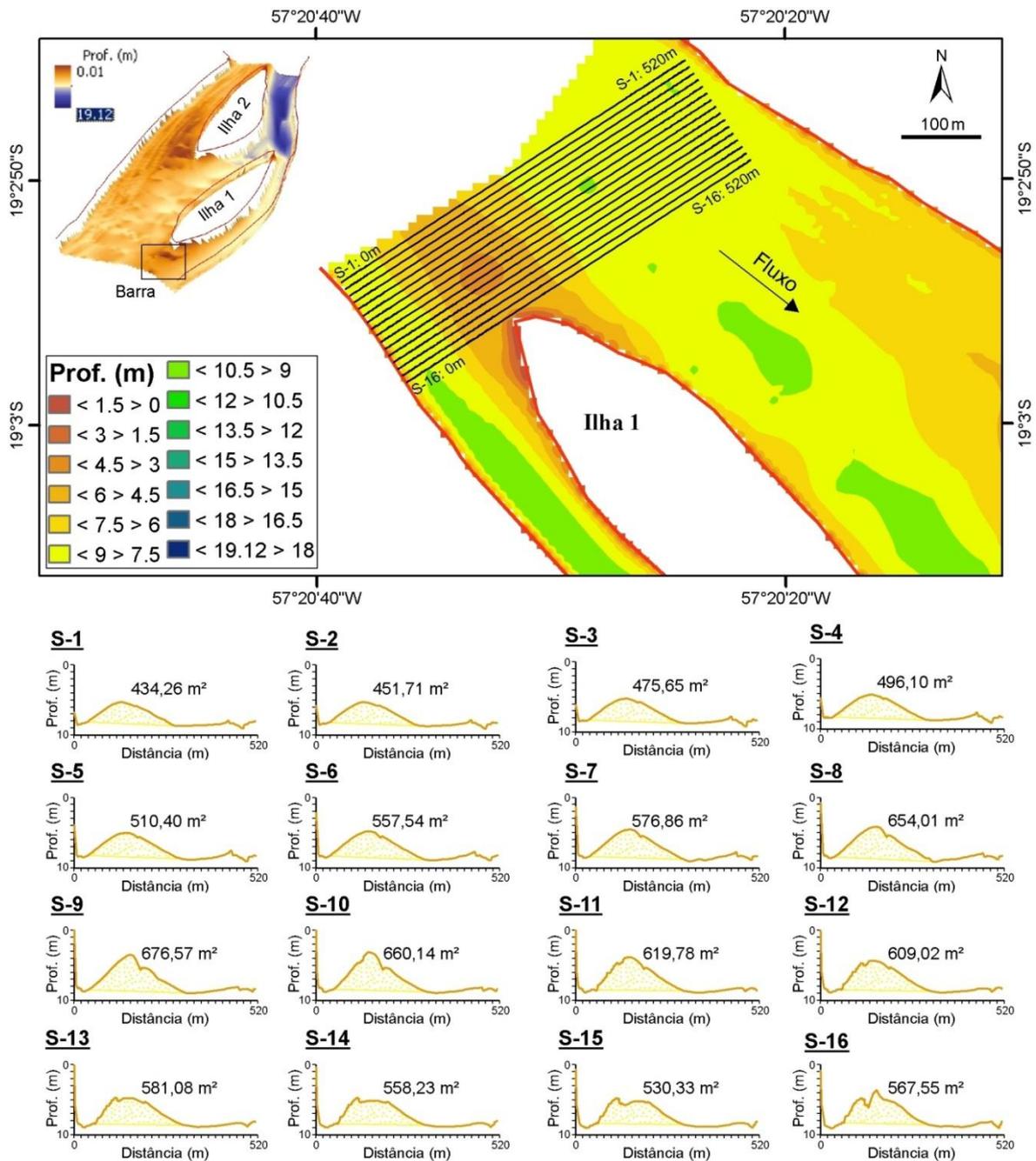
Seção	Css <sup>1</sup> (mg/L)	Csd <sup>2</sup> (mg/L)	Carga de Leito		Descarga sólida suspensa (t/dia)	Descarga sólida dissolvida (t/dia)	Descarga sólida de leito (t/dia)	Descarga sólida total (t/dia)
			D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)				
I4-1E	20,0	11	0,1370	0,1921	1.596,449	878,047	75,681	2.550,177
I4-1B	20,5	11	0,1378	0,1930	600,858	322,412	47,544	970,814
I4-1D	21,0	11	0,1387	0,1940	362,836	190,057	19,452	572,345
I4-2E	24,0	11	0,1745	0,2113	905,860	415,186	35,247	1.356,293
I4-2D	24,0	11	0,1745	0,2113	1.425,447	653,330	64,742	2.143,519
I4-3	19,0	11	0,0579	0,1405	529,587	306,603	7,386	843,568
I4-4	21,0	11	0,1535	0,2000	1.384,514	725,222	94,577	2.204,313
I4-5	20,0	11	0,1619	0,2104	1.917,15	1.054,433	139,242	3.110,825
I4-6	19,0	11	0,2386	0,3839	541,388	313,435	14,998	869,821
I4-7E	26,0	11	0,1873	0,3416	779,973	329,988	17,319	1.127,280
I4-7D	22,0	11	0,1873	0,3416	2111,988	1.055,994	104,796	3.272,778

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 57 e Figura 58.

O braço esquerdo da ilha 1 (I4-2), em seu trecho superior (entre a seção I4-2 e a margem esquerda da seção I4-1), possui regime sedimentar erosivo tanto na cheia (1,980 t/dia) quanto na seca (29,437 t/dia), o que leva a uma taxa de erosão média de 5.733,602 t/ano.

Ao encontrar a ilha 2, o braço esquerdo da ilha 1 sofre bifurcação, gerando, à direita, o canal com as maiores profundidades médias de todo o trecho (I4-4 e I4-5). Na cheia, o início desse braço (I4-4) apresenta as menores velocidades de fluxo, que ao se juntar com o braço direito da ilha 1 (I4-3) passa a ter as maiores profundidades e velocidade de fluxo (I4-5). Na seca, esse canal ganha velocidade de fluxo, tornando-se o de maior velocidade de todo o trecho. Por essas características, o trecho superior desse canal (entre a seção I4-4 e a margem direita da seção I4-2) apresenta taxa de deposição de 37,916 t/dia, na cheia, e taxa de erosão de 23,976 t/dia na seca, o que leva a uma taxa de deposição média de 2.544,05 t/ano.

**Figura 59** - Cálculo de volume da barra na cabeceira central da ilha 1 pelo método das seções.



Fonte: Elaborado pelo autor. A distância entre as seções é de 10 metros.

O braço direito da ilha 2 é a junção do fluxo do braço direito da ilha 1 (I4-3) com parte do fluxo do braço esquerdo dessa ilha. A outra parte do fluxo do braço esquerdo da ilha 1 compõe a vazão do braço esquerdo da ilha 2 (I4-6). Este apresenta as menores profundidades e a segunda menor vazão de todo o trecho. Na cabeceira jusante da ilha 2, os dois braços (I4-5 e I4-6) se juntam formando novamente canal único. Contudo, a topografia do leito após bifurcação da ilha 2 mostra que o rio estaria dividido em dois talwegues (Figura 58 [p.164]).

**Tabela 24** - Volume e massa da barra na cabeceira montante da ilha 1.

Seção	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Massa (tons)
S-1	434,26	4.342,57	11.507,80
S-2	451,71	4.517,06	11.970,21
S-3	475,65	4.756,55	12.604,85
S-4	496,10	4.961,02	13.146,71
S-5	510,40	5.103,98	13.525,54
S-6	557,54	5.575,43	14.774,89
S-7	576,86	5.768,64	15.286,88
S-8	654,01	6.540,07	17.331,18
S-9	676,57	6.765,69	17.929,09
S-10	660,14	6.601,37	17.493,62
S-11	619,78	6.197,81	16.424,19
S-12	609,02	6.090,23	16.139,10
S-13	581,08	5.810,82	15.398,68
S-14	558,23	5.582,29	14.793,06
S-15	530,33	5.303,28	14.053,68
S-16	567,55	5.675,53	15.040,16
TOTAL	8.959,23	89.592,32	237.419,65

Fonte: Elaborado pelo autor. Para localização das seções ver Figura 59.

O braço direito da ilha 2 possui 62,46 % da vazão total do rio Paraguai na cheia. Na seca, esse valor aumenta para 77,32 %. Tanto na cheia quanto na seca, a vazão do braço direito da ilha 2 (I4-5) é maior que a soma das vazões de seus canais alimentadores (I4-3 e I4-4) mostrando que neste trecho o rio não está perdendo água para a planície ou para a ilha.

A carga de fundo do braço direito da ilha 2, no canal entre as duas ilhas, é a segunda mais fina de todos os braços deste trecho (Tabela 22 e Tabela 23), e é composta de areia (99,12 %) e quase nada de lama (0,89 %). A areia nesse canal é fina (77,17 %) e muito fina (20,96 %) com pouca areia média (0,99 %). Mais a jusante, onde o canal se torna mais profundo e as velocidades de fluxo são maiores (I4-5), a carga de fundo possui menos areia (94,43 %) que a montante e a quantidade de lama aumenta (5,57 %). Na cheia, a carga de fundo, do braço direito na altura do meio da ilha 2, é composta principalmente de areia fina (76,40 %) e muito fina (18,55 %), com pouca lama (3,04 %) e material mais grosso (AM: 1,97 %; AG: 0,02 %; AMG: 0,02 %; Cascalho: 0,01 %). Na seca, o sedimento de fundo se torna um pouco mais grosso (Tabela 22 e Tabela 23) com redução da areia fina (66,75 %) e aumento de areia média (6,51 %) e lama (8,10 %).

Os dados de transporte de sedimento de fundo (Tabela 22 e Tabela 23) do braço direito da ilha 2 mostram que esse canal possui dinâmica erosiva tanto na cheia (84,845 t/dia) quanto na seca (37,287 t/dia) em seu trecho superior (entre a seção I4-5 e as seções I4-3 e I4-4). O trecho inferior (da seção I4-5 a I4-7D) desse braço é deposicional na cheia (33,688 t/dia) e na seca (34,446 t/dia). Essas taxas revelam que esse trecho do canal perde em média 22.289,09 t/ano em seu trecho superior e deposita em média 12.434,455 t/ano no trecho inferior.

O braço esquerdo da ilha 2 (I4-6) possui em média 27,76 % da vazão total do rio Paraguai neste arquipélago (em comparação com seção I4-1). Essa proporção é de 32,55 % na cheia e de 22,98 % na seca. Em relação ao braço esquerdo da ilha 1 (I4-2), o canal que alimenta este braço, essa proporção é de 40,65 % na cheia e de 29,53 % na seca. Por apresentar menor profundidade, o braço esquerdo da ilha 2 possui a segunda menor área úmida, maior apenas que o braço direito da ilha 1, que possui metade de sua largura. Essas características fazem com que este braço tenha maior redução da vazão na seca (~54 %) em comparação com o braço direito da ilha 2 (~19 %).

O balanço hidráulico do trecho entre as seções I4-2 e I4-6 mostra que 5,57 % da água neste trecho é transferida para a planície e para a ilha 2, na cheia. Esse valor corresponde 98,145 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a 983,648 t/ano de sedimento suspenso (considerando concentração de 2 mg/L e 58 dias por ano em que o rio está acima das margens plenas, conforme capítulo anterior). Essa quantidade de água também corresponde a 7.377,363 t/ano de sedimento dissolvido.

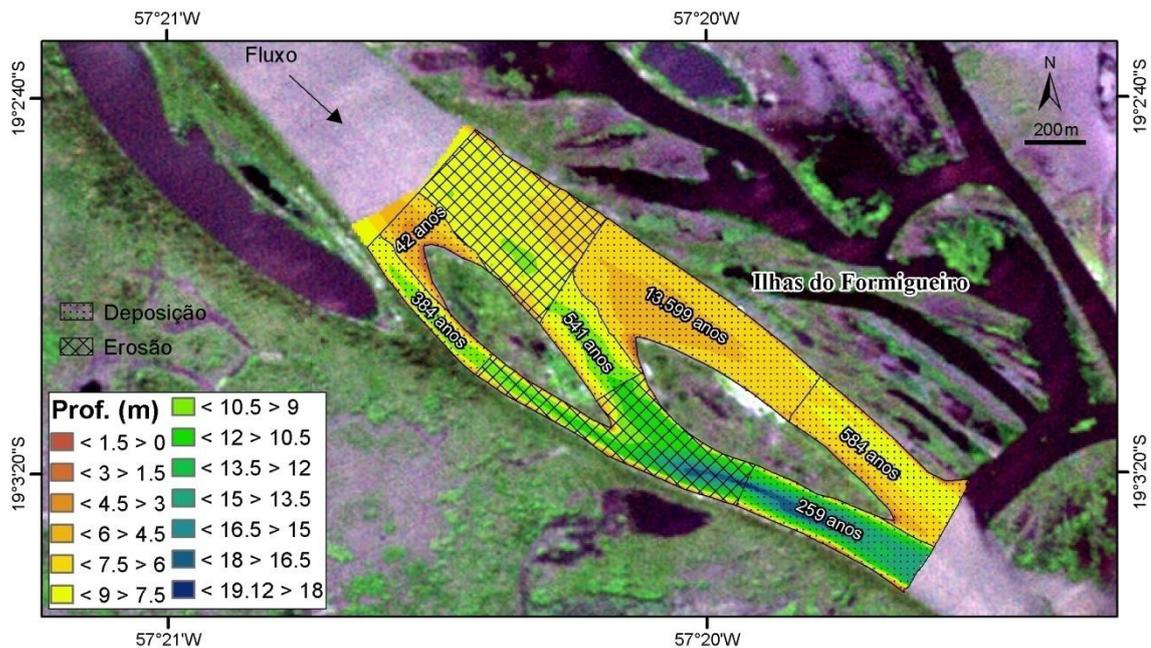
Com relação ao sedimento de fundo, o braço esquerdo da ilha 2 é composto predominantemente de areia (99,16 %) e quase não possui lama (0,85 %). Na cheia, esse braço apresenta carga de fundo composta de areia média (55,63 %) a fina (39,74 %) com pouca areia muito fina (3,18 %) e quase nada de lama (0,45 %). Na seca, a carga de fundo fica mais fina (Tabela 22 e Tabela 23) com aumento da quantidade de areia fina (47,08 %) e consequente diminuição da areia média (47,87 %). Além disso, a carga de fundo fica um pouco mais lamosa (1,24 %).

As descargas sólidas de leito (Tabela 22 e Tabela 23) indicam que o trecho superior (entre as seções I4-2E e I4-6) desse braço possui dinâmica erosiva na cheia, com taxas de erosão de 18,925 t/dia. Na seca, a dinâmica se inverte e 20,249 t/dia são depositados. Essas taxas mostram que 241,630 t/ano de sedimento de

fundo, em média, são depositados neste trecho. Já o trecho inferior desse braço apresenta taxas de deposição de 22,167 t/dia na cheia e erosão de 2,321 t/dia na seca. Essas taxas registram uma deposição média nesse trecho de 3.621,895 t/ano.

Com base nas taxas sedimentares calculadas, mapa da morfodinâmica do rio foi elaborado (Figura 60). Este mapa mostra que a ilha 1 do arquipélago estaria sofrendo forte deposição em sua cabeceira montante e que seriam necessários apenas 42 anos para que a ilha cresça aproximadamente 140 metros a montante (0,042 km<sup>2</sup>). Como o mapa mostra o tempo necessário para o total preenchimento do canal, tem-se que o braço que menos sofre modificações, atualmente, é o braço esquerdo da ilha 2, uma vez que as taxas deposicionais são menores se comparadas aos outros braços.

**Figura 60** - Morfodinâmica e tempo para preenchimento do canal nas ilhas do Formigueiro de acordo com as taxas deposicionais calculadas.



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem RapidEye.

O braço esquerdo da ilha 1 possui dinâmica erosiva e grande parte desse material de fundo é, provavelmente, depositada na cabeceira montante da ilha 2. O braço direito da ilha 1 apresenta dinâmica deposicional e ele seria o terceiro canal a ser totalmente preenchido, contudo, a batimetria desse canal não corrobora essa ideia.

A carga de fundo do braço direito da ilha 1 é muito lamosa e isto pode ser um indicativo de que esse canal na realidade recebe pouca areia, que fica retida na cabeceira montante desta ilha. Com a pouca areia recebida por esse canal, este sofreria erosão. Portanto, o material lamoso presente no leito do braço direito da ilha 1 seria proveniente da planície a qual o rio Paraguai flui. Informação que confirma esta hipótese é a carga de fundo do braço direito da ilha 2, que possui aumento da quantidade de lama na seca. Essa lama encontrada mais a jusante do braço direito da ilha 1 seria proveniente de processos erosivos que existem nos canais da margem direita do rio Paraguai nas ilhas do Formigueiro. Assim, a ilha 1 estaria sofrendo erosão em suas laterais e seu crescimento ocorreria em direção montante.

A ilha 2 que tem em seu lado direito um canal mais profundo, teria, assim, uma tendência de evolução para sua anexação à planície na margem esquerda do rio. Contudo, as taxas de deposição apresentadas no braço esquerdo dessa ilha revelam que isto ocorrerá após o fechamento do trecho inferior do braço direito, que apresenta as maiores taxas de deposição da área. Se as atuais taxas de deposição continuarem, o braço direito da ilha 2, que recebe a maior quantidade de água, será fechado em menos de 300 anos, e isto conduzirá ao total assoreamento de todo o lado direito do arquipélago. Com essa nova configuração, o lado esquerdo do arquipélago, que atualmente é o mais assoreado, poderá ter dinâmica erosiva e o rio Paraguai passará a fluir em canal único através de seus canais da margem esquerda.

### **8.3. Conclusões**

Os três trechos multicanais do rio Paraguai estudados neste capítulo apresentam dinâmica morfológica distinta. Essa diferenciação parece associada às características hidrossedimentares de cada compartimento do rio Paraguai na PFPC. A carga de fundo nas três ilhas possui características peculiares de acordo com a localidade de cada ilha. Na ilha Laranjeira, o rio Paraguai não apresenta, de modo geral em todo o trecho, mudança da composição da carga de fundo de acordo com o período hidrológico, pois a ilha está localizada no início do primeiro compartimento do rio Paraguai (capítulo 7), região na qual a PFPC ainda não se alargou e que possui grande troca hídrica com a bacia de inundação. Apesar disso, a carga de fundo no canal antes de se bifurcar é mais grossa no período de seca, pois nesse compartimento do rio Paraguai, o canal perde potência na seca e com

isso os sedimentos maiores ficam retidos nesse trecho da ilha. Já a ilha Limoeiro, que está localizada no segundo compartimento, apresenta grandes mudanças nas características da carga de leito, que se torna mais grossa no período de seca, já que o efeito remanso existente neste compartimento não está ativo nesse período. O rio Paraguai nas ilhas do Formigueiro também não apresenta mudanças significativas, de modo geral, na composição de sua carga de leito. Entretanto, os primeiros dois braços dessas ilhas mostram grande mudança na carga de leito, em que esta carga se torna mais grossa na seca. Isto mostra que na seca, período sem o efeito remanso, sedimento de fundo de maior calibre pode alcançar os trechos inferiores do rio Paraguai. Contudo, o canal antes da bifurcação apresenta afinamento do sedimento de fundo no período de seca, provavelmente devido ao fato de receber menor contribuição sedimentar do rio Taquari nesse período, o que pode contrariar a lógica existente na ilha acima.

O rio Paraguai na ilha Laranjeira é um local de constantes trocas sedimentares com sua planície, onde mais de 300 t/ano de sedimento suspenso são transferidas à bacia de inundação na cheia. A carga de fundo do braço direito dessa ilha é mais grossa que o braço esquerdo, apesar de este apresentar velocidades de fluxos maiores, o que poderia significar maior potência de canal. No entanto, as potências nesses canais praticamente se igualam e este fator não é o responsável pela diferença no tamanho da carga de fundo. O fator que parece levar a essa diferença é a bifurcação do fluxo na cabeceira montante da ilha, o qual é mais veloz em seu lado direito.

Portanto, a configuração morfológica do rio Paraguai na ilha Laranjeira provoca divisão no fluxo que leva a maiores taxas sedimentares no braço direito da ilha, que estaria evoluindo para a anexação desta à planície na margem direita do rio. Apesar de a composição da carga de fundo do rio Paraguai na ilha Laranjeira não sofrer modificação de modo geral, a diminuição da velocidade de fluxo no período de seca acarreta menor competência do rio, que passa a depositar sedimento mais grosso no canal antes da bifurcação. Com isto, o canal após a ilha apresenta carga de fundo mais fina, já que as partículas maiores ficam retidas na cabeceira montante da ilha. Diminuição do calibre da carga de fundo também ocorre no braço esquerdo da ilha Laranjeira na seca.

O trecho do rio Paraguai na ilha Limoeiro está situado no compartimento em que forte remanso ocorre na hidráulica do rio. Esse fenômeno hidrológico acarreta em inversão da dinâmica hidrossedimentar do rio Paraguai na área estudada, uma vez que as maiores velocidades de fluxo e, conseqüentemente, as maiores taxas de descarga sólidas ocorrem no período de seca da região. Com menos sedimento alcançando a ilha Limoeiro no período de cheia, a morfodinâmica do rio neste trecho é praticamente nula, posto que pouca deposição e erosão ocorrem neste trecho. Deste modo, as maiores modificações na morfologia do rio Paraguai na ilha Limoeiro surgem no período de águas baixas, o que é oposto ao que acontece em outros trechos do rio. Com o desaparecimento do remanso que existia na cheia e incremento da velocidade de fluxo, sedimentos mais grossos alcançam o segundo compartimento do rio Paraguai. Esses sedimentos são distribuídos diferentemente nos canais da ilha Limoeiro, que possui maior deposição na sua cabeceira montante. A evolução da morfodinâmica da ilha, possivelmente, levará à anexação desta à planície na margem esquerda do rio Paraguai. Essa anexação culminará no fechamento do braço esquerdo que apresentará características semelhantes aos canais de ressaco existentes nas ilhas do rio Paraná.

O rio Paraguai nas ilhas do Formigueiro possui morfodinâmica mais complexa que nas demais ilhas. Os canais da margem direita estão em processo de erosão, o que gera as grandes profundidades encontradas nesses canais. Como esses canais recebem pouco aporte de areia, que fica retida a montante, as altas velocidades de fluxo produzem feições erosivas no leito, sendo a mais evidente destas a grande profundidade existente no braço direito da ilha 2. No entanto, a parte inferior desse braço possui altas taxas de deposição, que levará ao assoreamento deste canal antes mesmo dos canais da margem esquerda, que são mais rasos. Portanto, a morfodinâmica deste trecho *anabanching* do rio Paraguai ainda é muito pouco compreendida e mais trabalhos sobre este assunto devem ser realizados neste trecho do rio.

Semelhante ao que ocorre na ilha Limoeiro, as velocidades de fluxo no arquipélago do Formigueiro aumentam na seca, mas com menos intensidade que naquela ilha. Contudo, o aumento da velocidade de fluxo não acarreta em aumento de vazão, pois a área úmida do canal também diminui, devido, principalmente, a diminuição da profundidade. Ademais, há diferenciação entre os canais da margem

direita e os da margem esquerda, em que estes têm diminuição da velocidade de fluxo na seca e, conseqüentemente, diminuem a capacidade e competência do canal, acarretando em sedimento de fundo de maior calibre e assoreamento do canal. A diferenciação na hidráulica dos canais das ilhas do Formigueiro acarreta em diferenciação da morfodinâmica dos canais. Apesar de, na seca, o sedimento que chega ao arquipélago ser mais fino que na cheia, pelo fato da menor contribuição sedimentar do rio Taquari (ver contribuição sedimentar do rio Paraguai-Mirim no capítulo anterior), o sedimento de fundo se distribui de forma diferente nos canais que formam o arquipélago.



## 9. CONCLUSÃO

O escopo deste trabalho foi a caracterização geomorfológica da planície do rio Paraguai, da lagoa Vermelha à confluência do rio Miranda, na busca por evidências que registrem mudanças paleo-hidrológicas do sistema; e a caracterização hidrossedimentar do rio Paraguai, a qual passa pelo entendimento dos processos atuantes na evolução do sistema deposicional. Os objetivos propostos foram alcançados e os resultados obtidos compuseram os capítulos 5, 6, 7 e 8, organizados para serem convertidos em trabalhos para publicação em periódicos científicos, atendendo, assim, exigências do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do IGCE/UNESP.

A Planície Fluvial Paraguai-Corumbá é uma área que abriga importantes registros geomorfológicos que evidenciam mudanças paleo-geográficas na área. Essas mudanças são também registros inequívocos de ajustes no sistema fluvial por conta de alterações climáticas que afetaram todo o Pantanal.

Com o mapeamento geomorfológico da área foi possível identificar e caracterizar associações de formas de relevo deposicional que constituem a PFPC. O cinturão de meandros atual possui idade holocênica (2 a 1,5 ka AP), enquanto que o paleocinturão tem o início de sua formação na transição Pleistoceno-Holoceno, mas esteve ativo até o Holoceno superior. O paleocinturão de meandros foi reavaliado e foi constatado que este é um sistema meandrante de canal único, diferentemente do que se pensava anteriormente.

Evidências de mudanças ambientais foram reconhecidas na PFPC, sendo os paleocinturão de meandros a maior dessas. A morfologia mais antiga da PFPC é a bacia de inundação com formas canal-elevado, formada durante o Pleniglacial (50 - 19 ka AP). Na região mais ao sul da bacia de inundação, as formas canal-elevado convergem e formam canais meandrantes com marcas de migração lateral (*scroll bars*). Isso decorre, provavelmente, em razão da configuração da área em relação à bacia.

As idades dos canais meandrantes na bacia de inundação são próximas ao UMG, o que pode ser um indicativo de que o clima da área era muito mais úmido. Essas informações mostram que as formas presentes na bacia de inundação são

produto não apenas da localização da área em relação à bacia, mas também de um clima mais úmido durante o UMG.

Ao final do Pleistoceno superior, quando o aumento da temperatura acarretou num clima mais úmido, e conseqüentemente, maiores descargas fluviais, um cinturão de meandros se formou próximo à franja do leque do Taquari. Com o aumento da descarga do sistema, por volta de ~13 ka AP, promovida pelo aumento da precipitação, o rio Paraguai construiu seu primeiro cinturão de meandros, local onde, hoje, estão as marcas do paleocinturão de meandros na área. Essa associação morfológica foi construída até por volta dos 1,5 ka AP.

Mudança no curso do rio Paraguai iniciou-se por volta de 2 ka AP, momento em que o clima da região é muito próximo ao atual, o que favoreceu rompimentos das margens do rio, culminando no processo de avulsão. Essa avulsão dá origem ao cinturão de meandros atual do rio Paraguai. Em seu princípio, o novo canal do rio Paraguai era composto por diversos canais que fluíam em uma rede anastomosada. Com o progressivo aumento da precipitação, o rio Paraguai passou a escoar em canal único a partir de aproximadamente 1,5 ka AP, formando, dessa forma, o cinturão de meandros que existe hoje. Portanto, a hipótese levantada nesta tese foi refutada pelos resultados obtidos que mostram que a avulsão do rio Paraguai não se deu no Holoceno inferior/médio, e sim no Holoceno superior.

Cinco trechos foram reconhecidos no cinturão de meandros atual do rio Paraguai, que apresenta trechos de canal com padrão meandrante e trecho com padrão retilíneo (terceiro trecho). Essa mudança de sinuosidade é decorrente de condicionamento estrutural, pois o rio em seu terceiro trecho está ajustado à linha de falha, limite oeste da bacia do Pantanal.

Os resultados mostram que a PFPC possui uma história de evolução marcada por mudanças no padrão fluvial do rio, avulsão e abandono de cinturão de meandros, originados provavelmente devido a alterações climáticas regionais. Esses eventos fizeram com que a paisagem fosse modificada ao longo do tempo geológico, desde o Pleistoceno, cuja reconstituição foi possível devido à presença de formas deposicionais que possibilitaram essa interpretação. Além disso, datações das formas permitiram definir melhor as idades das morfologias da área.

Com relação à dinâmica hidrossedimentológica da PFPC, os levantamentos feitos na área mostram que a planície é um complexo sistema hidrogeomorfológico com funcionamento peculiar. O rio perde água para a planície em momentos de fluxo acima das margens do canal e a água aos poucos retorna para o canal por meio de fluxo de base e fluxo em lençol. Dessa forma, a bacia de inundação comporta-se como um reservatório que armazena água nos momentos de cheia, devolvendo-a para o rio Paraguai gradativamente, o que resultou nas descargas fluviais registradas nas estações fluviométricas de São Francisco, Ladário e Porto da Manga.

No entanto, as descargas ao longo do rio Paraguai não são produto apenas dessa dinâmica. A hidrologia do rio Paraguai na PFPC é fortemente influenciada pelo efeito remanso existente na área. Esse fenômeno hidrológico causa a diminuição da velocidade do fluxo e isto acarreta a diminuição da vazão do rio Paraguai em seu médio curso.

Neste trabalho, foi demonstrado que os fatores responsáveis pelo remanso no rio Paraguai são: 1) As características geológico-geomorfológicas da área, que possui estrangulamento da planície em sua porção distal; 2) A hidrologia da área, que possui enchimento reverso, em que o rio Paraguai enche de jusante para montante.

Devido a essa hidrologia incomum, a morfodinâmica do rio Paraguai se modifica de acordo com o período hidrológico. Em momentos de águas baixas, o sistema se comporta como uma drenagem tributária, e o rio ganha vazão ao longo de seu curso. Na cheia, a hidrologia do sistema é alterada, tanto pelo efeito remanso como pela perda de água do canal para a planície, e isso causa mudanças na morfodinâmica do canal. Com maior vazão, o trecho mais superior do rio Paraguai transporta mais sedimento de fundo, tornando-se um trecho deposicional. Na seca, essa dinâmica se altera e o rio passa a erodir sua carga de fundo. A dinâmica alternada entre cheia e seca ocorre também nos demais trechos do rio Paraguai, que possui balanço sedimentar positivo em todo o trecho estudado, indicando que o rio está em desequilíbrio sedimentar.

A carga suspensa do rio Paraguai é algo bem peculiar do sistema PFPC, no qual a concentração do sedimento suspenso é menor no período úmido. Esse fato é

algo que destoa bastante das bacias de drenagem situadas em planaltos, em que as maiores concentrações de carga suspensa são encontradas no período úmido.

Portanto, entender as modificações na paisagem é algo importante para o planejamento do uso e ocupação da área, para a utilização do rio Paraguai como via de navegação e escoamento de produtos, e para iniciativas de prevenção e conservação, dada a fragilidade do sistema às interferências antrópicas. Assim, espera-se que este trabalho seja uma contribuição para essas questões, além de um avanço nos conhecimentos acerca das mudanças ambientais que tem ocorrido na bacia ao longo do Quaternário tardio.

## REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N.. O Pantanal Mato-Grossense e a teoria dos refúgios. **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro, 50, v.2, n. especial, p.9-57, 1988.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS [ANA]. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Base de dados Hidroweb. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: Janeiro de 2016.
- ALHO, C.J.R.; LACHER, T.E.; GONÇALVES, H.C. Environmental degradation in the Pantanal ecosystem. **Bioscience**, v.38, p.164–171, 1988.
- ALMEIDA, F.F.M.. Geologia do sudoeste Matogrossense. **Boletim do DNPM/DGM**, v.116, p.1-118, 1945.
- ANA/GEF/PNUMA/OEA. Diagnóstico analítico do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. **In: Implementação de práticas de gerenciamento integrado de bacia hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai**. Subprojeto 9.4A. Brasília, 2003.
- AQUINO, S.; STEVAUX, J.C.; LATRUBESSE, E.M. Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.6, p.29-41, 2005.
- ASHWORTH, P.J.; LEWIN, J.. How do big rivers come to be different? **Earth Sci. Rev.**, v.114, n.1-2, p.84-107, 2012. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.05.003.
- ASSINE, M. L. **Sedimentação na bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. 105 f. Tese de Livre-Docência - UNESP, Rio Claro-SP, 2003.
- ASSINE, M. L. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. **Geomorphology**, v.70, p.357-371, 2005.
- ASSINE, M. L.. Taquari: um rio mutante. **In: Simpósio de Geotecnologia no Pantanal**, 2., 2009, Corumbá-MS. **Anais...** Campinas/São Jose dos Campos: Embrapa/INPE, 2009. p.1034-1040.
- ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; ANGULO, R. J. Construção e abandono de lobos na evolução do leque do rio Taquari, Pantanal Mato-grossense. **In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, 6., 1997, Curitiba. **Resumos...** Curitiba: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - ABEQUA, 1997, p.431-433.
- ASSINE, M. L.; SOARES, P. C. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. **Quaternary International**, v.114, p.23-24, 2004.
- ASSINE, M. L.; SILVA, A. Contrasting fluvial styles of the Paraguay River in the northwestern border of the Pantanal wetland, Brazil. **Geomorphology**, v.113, p.189-199, 2009.

- ASSINE, M. L.; PADOVANI, C.R.; ZACHARIAS, A.A.; ANGULO, R.J.; SOUZA, M.C. Compartimentação geomorfológica, processo de avulsão fluvial e mudanças do curso do rio Taquari, Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.6, n.1, p.97-108, 2005.
- ASSINE, M.L.; CORRADINI, F.A.; PUPIM, F.N.; MCGLUE, M.M.. Channel arrangements and depositional styles in the São Lourenço fluvial megafan, Brazilian Pantanal wetland. **Sedimentary Geology**, v.301, p.172-184, 2014. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2013.11.007.
- ASSINE, M.L.; MERINO, E.R.; PUPIM, F.N.; MACEDO, H.A.; SANTOS, M.G.M. The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v.45, n.3, p.475-489. 2015a. DOI: 10.1590/2317-4889201520150014.
- ASSINE, M.L.; MACEDO, H.A.; STEVAUX, J.C.; BERGIER, I.; PADOVANI, C.R.; SILVA, A. Avulsive Rivers in the Hydrology of the Pantanal Wetland. In: Ivan Bergier e Mario Assine (ed.), **Dynamics of the Pantanal wetland in South America**, Hdb Env Chem, v.37, p.83-110, 2015b. DOI: 10.1007/698\_2015\_351.
- BARROS, C.S.. **Dinâmica sedimentar e hidrológica na confluência do rio Ivaí com o rio Paraná, município de Icaraíma, PR**. Dissertação de Mestrado (Análise Regional e Ambiental) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006, 59p.
- BEZERRA, M. A. O.; MOZETO, A. A. Deposição de carbono orgânico na planície de inundação do rio Paraguai durante o Holoceno Médio. **Oecologia Brasiliensis**, v.12, n.1, p.155-171, 2008.
- BIAZIN, P.C.. **Característica sedimentar e hidrológica do rio Ivaí em sua foz com o rio Paraná, Icaraíma, PR**. Dissertação de Mestrado (Análise Regional e Ambiental) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá: 2005, 73p.
- BIEDENHARN, D.S.; COPELAND, R.R. **Effective discharge calculation**. Technical note. U.S. Army Engineer Research and Development Center. Vicksburg, MS, 10p. 2000.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.; PAZ, A.R; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Coupled Hydrologic-Hydraulic Modeling of the Upper Paraguay River Basin. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.17, p-635-646, maio-2012.
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A.R.; ALLASIA, D.; DOMECCQ, F. Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Paraguay River basin. **Climatic Change**, v.127, p.27-41, 2014. DOI 10.1007/s10584-013-0816-2.
- BURBRIDGE, R., MAYLE, F., KILLEEN, T.. Fifty-thousand-year vegetation and climate history of Noel Kempff Mercado National Park, Bolivian Amazon. **Quaternary Research**, v.61, n.2, p.215-230, 2004. DOI: 10.1016/j.yqres.2003.12.004.

- CALHEIROS, D.F.; FERREIRA, C.J.A.; PELLEGRIN, A.O.; SILVA, R.A.S.  
**Determinação das causas de mortandade de peixes no Pantanal.**  
EMBRAPA CPAP. Relatório Interno.24p, 1991.
- CALHEIROS, D.F.; HAMILTON, S.K. Limnological conditions associated with natural fishkills in the Pantanal Wetland of Brazil. **Verhandlugen Internationalen Vereinte Limnologie**, v.26, p.2189-2193, 1998.
- CARAGNANO, C. A. Late Pleistocene to recent climate change in Cordoba Province, Argentina. **Quaternary International**, v.57/58, p.117-134, 1999.
- CARLING, P.; JANSEN, J.; MESHKOVA, L. Multichannel rivers: their definition and classification. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.39, p-26-37, 2014. DOI: 10.1002/esp.3419
- CARVALHO, N.O.. **Hidrossedimentologia prática.** Rio de Janeiro: CPRM/Eletróbrás. 2008, 352p.
- CHARLTON, R. **Fundamentals of Fluvial Geomorphology.** 1. ed. London and New York: Routledge, 2008. 223p.
- CHASE, C.G.; SUSSMAN, A.J.; COBLENTZ, D.D. Curved Andes: geoid, forebulge, and flexure. **Lithosphere**, v.1, n.6, p.358-363, 2009.
- CHENG, H.; SINHA, A.; CRUZ, F.W.; WANG, X.; EDWARDS, R.L.; D'HORTA, F.M.; RIBAS, C.C.; VUILLE, M.; STOTT, L.D.; AULER, A.S.. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. **Nat. Commun.**, v.4, n.1411, p.1-6, 2013. DOI: 10.1038/ncomms2415.
- CLARKE, R. T.; TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. Variabilidade temporal no regime hidrológico da bacia do rio Paraguai. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.201-211, mar, 2003.
- COLLISCHONN, B.; BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; VILLANUEVA, A.; ALLASIA, D.; TUCCI, C.E.M. Estimativa preliminar do comprimento de remanso no rio Paraguai a montante de Amolar. In: *Simpósio de Águas da AUGM*, 1., 2005, Santa Maria-RS. **Anais...** Santa Maria: AUGM, 2005. p.1-9.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Science Journal**. v.52, n.5, p.878-895, Oct, 2007. DOI 10.1623/hysj.52.5.878
- CONWAY, D.; MAHÉ, G.. River flow modelling in two large river basins with non-stationary behavior: the Paraná and the Niger. **Hydrological Processes**, v.23, n.22, p.3186-3192, 2009. DOI: 10.1002/hyp.7393.
- CORRADINI, F.A. **Geomorfologia fluvial, mudanças ambientais e evolução do megaleque do rio São Lourenço, Quaternário do Pantanal Mato-Grossense.** Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) - UNESP, Rio Claro-SP, 2011, 164p.

- CROWDER, D.W.; KNAPP, H.V. Effective discharge recurrence intervals of Illinois streams. **Geomorphology**, v.64, p.167-184, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.06.006.
- CRUZ, F.W.; VUILLE, M.; BURNS, S.J.; WANG, X.; CHENG, H.; WERNER, M.; LAWRENCE EDWARDS, R.; KARMANN, I.; AULER, A.S.; NGUYEN, H.. Orbitally driven east-west antiphasing of South American precipitation. **Nat. Geosci.**, v.2, p.210-214, 2009. DOI: 10.1038/ngeo444.
- CZAPIGA, M.J.; SMITH, V.B.; NITTROUER, J.A.; MOHRIG, D.; PARKER, G. Internal connectivity of meandering rivers: Statistical generalization of channel hydraulic geometry. **Water Resources Research**, v.51, n.9, p.7485-7500, 2015. DOI: 10.1002/2014WR016133.
- DE FREITAS, H.A.; PESSENDA, L.C.R.; ARAVENA, R.; GOUVEIA, S.E.M.; DE SOUZA RIBEIRO, A.; BOULET, R.. Late Quaternary vegetation dynamics in the southern Amazon Basin inferred from carbon isotopes in soil organic matter. **Quaternary Research**, v.55, n.1, p.39-46, 2001.
- De OLIVEIRA, P.E. **A palynological record of the late Quaternary vegetational and climatic change in southeastern Brazil**. Tese de Doutorado – Ohio State University, Ohio-Columbus, 1992.
- De ROSE, R.C.; STEWARDSON, M.J.; HARMAN, C.. Downstream hydraulic geometry of rivers in Victoria, Australia. **Geomorphology**, v.99, n.1-4, p.302-316, 2008.
- DEL'ARCO, J. O.; SILVA, R.H.; TARAPANOFF, I.; FREIRE, F.A.; PEREIRA, L.G.M.; SOUZA, S.L.; LUZ, D.S.; PALMEIRA, R.C.B.; TASSIRANI, C.C.G. Geologia - Folha SE.21 Corumbá e parte da folha SE.20. In: **Projeto RADAMBRASIL - Levantamento de Recursos Naturais**. Rio de Janeiro-RJ: MME/SG, 1982, v.27, p.25-160.
- DINGMAN, S.L.. Analytical derivation of at-a-station hydraulic-geometry relations. **Journal of Hydrology**, v.334, n.1-2, p.17-27, 2007.
- DINGMAN, S.L. **Fluvial Hydraulic**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press. 2009, 570p. ISBN 978-0195172867.
- DOS SANTOS, V.C. **Processos fluviais em barra de soldamento: rio Paraná-PR**. Dissertação de Mestrado (Geociências e Meio Ambiente) - UNESP, Rio Claro-SP, 2010, 86p.
- ESRI. **Environmental System Research Institute**. 2010. ArcGIS 10. Redlands – California.
- FACINCANI, E. M.; ASSINE, M. L.; SILVA, A.; ZANI, H.; ARAUJO, B. C.; MIRANDA, G. M.. Geomorfologia fluvial do leque do rio Aquidauana, borda sudeste do Pantanal, MS. In: *Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, 1., 2006, Campo Grande-MS. **Anais...** Campo Grande: INPE, 2006. p.175-181.

- FILIZOLA, N.P.; GUYOT, J.L.; QUINTANILLA, J.; CORTES, J.. Fluxo de matéria dissolvida e particulada dos Andes Bolivianos à Amazônia Brasileira através do rio Madeira. *In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 12., 1997, Vitória- ES. **Anais...** Vitória: ABRH, 1997.
- FORNACE, K.L.; WHITNEY, B.S.; GALY, V.; HUGHEN, K.A.; MAYLE, F.E. Late Quaternary environmental change in the interior South American tropics: new insight from leaf wax stable isotopes. **Earth and Planetary Science Letters**, v.438, p.75-85, 2016. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.01.007.
- FRANCO, M. S.; PINHEIRO, R. Geomorfologia - Folha SE.21 Corumbá e parte da folha SE.20. *In: Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais*. Rio de Janeiro: MME/SG, 1982, v.27, p.161-224.
- GALBRAITH, R.F.; ROBERTS, R.G.; LASLETT, G.M.; YOSHIDA, H.; OLLEY, J.M. Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rockshelter, northern Australia. Part I: Experimental design and statistical models. **Archaeometry**, v.41, p.339–364, 1999.
- GARCIA, M. L.; BASILE, P. A.; RICCARDI, G. A. Modelación de crecidas extraordinarias en sistema cauce-planicie del Río Paraná inferior. *In: Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos – Ríos*, 6., 6 al 8 de noviembre 2013, Santa Fe, Argentina. **Anais...** Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral, 2013a. p.1-19. CD rom.
- GARCIA, M.L.; BASILE, P.A.; RICCARDI, G.A. Modelación Sedimentológica em sistema cauce-planicie del Río Paraná inferior. *In: Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos – Ríos*, 6., 6 al 8 de noviembre 2013, Santa Fe, Argentina. **Anais...** Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral, 2013b. p.1-19. CD rom.
- GARREAUD, R.D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J.. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v.281, n.3, p.180-195, 2009. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.
- GON, P.P. **Morfologia e hidrodinâmica em rios multicanais (“anabranching”): exemplo do alto rio Paraná**. Dissertação de Mestrado (Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro-SP, 2012, 69p.
- GRISON, F. **Geometria hidráulica de bacias hidrográficas paranaenses**. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010, 160p.
- HARMAN, C.; STEWARDSON, M.; De ROSE, R. Variability and uncertainty in reach bankfull hydraulic geometry. **Journal of Hydrology**, v.351, n.1-2, p.13-25, 2008.
- HORTON, B.K.; DECELLES, P.G. The modern foreland basin system adjacent to the Central Andes. **Geology**, v.25, n.10, p.895-898, 1997.

- HUGGETT, R.J. **Fundamentals of geomorphology**. 2. ed. Nova York: Routledge, 2007. (Routledge Fundamentals of Physical Geography Series). ISBN 0-203-94711-8
- IBGE – EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 - Escala 1:5.000.000. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa\\_solos.php](http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php). Acesso em: 17/07/2017.
- IRIONDO, M.H.; GARCÍA, N.O.. Climatic variations in the Argentine plains during the last 18,000 years. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.** v.101, n.3-4, p.209-220, 1993.
- JANSEN, J. D; NANSON, G.C.. Anabranching and maximum flow efficiency in Magela Creek, northern Australia, **Water Resour. Res.** v.40, W04503, 2004. doi: 10.1029/2003WR002408.
- JUNK, W.J; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E..The flood pulse concept in River-Floodplain systems. *In:* D.P. Dodge [ed.] **Proceedings...** International Large River Symposium. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 106, 1989. p.110-127
- JUNK, W. J.; CUNHA, C. N.; WANTZEN, K. M.; PETERMANN, P.; STRÜSSMANN, C.; MARQUES, M. I.; ADIS, J. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Science**, v.68, p.278-309, 2006.
- KASSE, C.; HUIJZER, A.S.; KRZYKOWSKI, D.; BOHNCKE, S.J.P.; COOPE, G.R.. Weichselian Late Pleniglacial and Late-glacial depositional environments, Coleoptera and periglacial climatic records from central Poland (Bełchatów). **Journal of Quaternary Science**, v.13, p.455-469, 1998. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1417(1998090)13:5<455::AID-JQS398>3.0.CO;2-T).
- KNIGHTON, D. **Fluvial forms and processes: a new perspective**. London: Arnold, 1998, 383p.
- KREPPER, C.M.; GARCÍA, N.O; JONES, P.D. Paraguay river basin response to seasonal rainfall. **International Journal of Climatology**, v.26, n.9, p.1267–1278, 2006.
- KUERTEN, S. **Evolução geomorfológica e mudanças ambientais no megaleque do Nabileque, Quaternário do Pantanal Mato-Grossense**. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) - UNESP, Rio Claro-SP, 2010.
- KUERTEN, S.; SANTOS, M.L.; SILVA, A.. Variação das características hidrossedimentares e geomorfologia do leito do rio Ivaí – PR, em seu curso inferior. **Geociências**, v.28, n.2, p.143-151, 2009.
- KUERTEN, S.; PAROLIN, M.; ASSINE, M.L.; MCGLUE, M.M. Sponge spicules indicate Holocene environmental changes on the Nabileque River floodplain, southern Pantanal, Brazil. **Journal of Paleolimnology**, v.49, n.2, p.171-183, 2013. DOI: 10.1007/s10933-012-9652-z.

- LATRUBESSE, E. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology**, v.101, n.1-2, p.130-145, 2008.doi:10.1016/j.geomorph.2008.05.035.
- LATRUBESSE, E.. Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive fluvial systems: A potential “who's who” in the geological record. **Earth-Science Reviews**, v.146, p.1-30, 2015.
- LATRUBESSE, E.; FRANZINELLI, E.M..The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. **Geomorphology**, v.70, n.3-4, p.372-397, 2005.
- LATRUBESSE, E.M.; AMSLER, M.; MORAIS, R.P.; AQUINO, S.. The geomorphic responses of large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: The case of the Araguaia River. **Geomorphology**, v.113, n.3-4, p.239-252, 2009.
- LATRUBESSE, E.M.; STEVAUX, J.C.; CREMON, E.H.; MAY, J.; TATUMI, S.H.; HURTADO, M.A.; BEZADA, M.; ARGOLLO, J.B. Late Quaternary megafans, fans and fluvio-aeolian interactions in the bolivian Chaco, Tropical South America. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.356-357, p.75-88, 2012.
- LEDRU, M.P.; BRAGA, M.P.; SOUBIES, F.; FOURNIER, M.; MARTIN, L.; SUGUIO, K. The last 50,000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of vegetation and climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.123, p.239-257, 1996.
- LEDRU, M.P.; ROUSSEAU, D.D.; CRUZ, F.W.; RICCOMINI, C.; KARMANN, I.; MARTIN, L.. Paleoclimate changes during the last 100,000 yr from a record in the Brazilian Atlantic rainforest region and interhemispheric comparison. **Quaternary Research**, v.64, n.3, p.444-450, 2005. DOI: 10.1016/j.yqres.2005.08.006.
- LELI, I.T. **Gênese, evolução e geomorfologia das ilhas e planície de inundação do alto rio Paraná**. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) - UNESP, Rio Claro-SP, 2015.
- LENTERS, J.D.; COOK, K.H. Summertime precipitation variability over South America: role of the large-scale circulation. **Monthly Weather Review**, v.127, n.3, p.409–431, mar, 1999.
- LENZI, M.A.; MAO, L.; COMITI, F. Effective discharge for sediment transport in a mountain river: computational approaches and geomorphic effectiveness. **Journal of Hydrology**, v.326, p.257-276, 2006.
- LEOPOLD, L.B. **A view of the river**. Cambridge, MS: Harvard University Press. 1994, 290p.

- LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. Jr. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **Geological Survey Professional Paper**, n.252, 1953.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. **Fluvial processes in geomorphology**. New York: Dover Publication. 1995.
- LIMA, J.E.F.W.; SANTOS, P.M.C.; CHAVES, A.M.G.; SCILEWSKI, L.R.. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados: ANA e ANEEL, 2001, 108p.
- MA, Y.; HUANG, H.Q.; XU, J.; BRIERLEY, G.J.; YAO, Z.. Variability of effective discharge for suspended sediment transport in a large semi-arid river basin. **Journal of Hydrology**. v.388, p.357-369, 2010.
- MACEDO, H. A. **Geomorfologia e hidrossedimentologia da planície do rio Paraguai, da lagoa Vermelha à confluência do rio Miranda, Pantanal Mato-Grossense**. Dissertação de Mestrado (Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro-SP, 2013.
- MACEDO, H.A.; ASSINE, M.L.; SILVA, A.; PUPIM, F.N.; MERINO, E.R.; STEVAUX, J.C. Mudanças paleo-hidrológicas na planície do rio Paraguai, Quaternário do Pantanal. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n.1, p.75-85, 2014. DOI: 10.20502/rbg.v15i1.431.
- MACEDO, H.A.; STEVAUX, J.C.; ASSINE, M.L.; SILVA, A.; PUPIM, F.N.; MERINO, E.R.; LO, E. Calculating bedload transport in rivers: concepts, calculus routine and application. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.18, n.4, p.813-824, 2017a. DOI: 10.20502/rbg.v18i4.1227.
- MACEDO, H.A.; STEVAUX, J.C.; ASSINE; M.L.; SILVA, A.; PUPIM, F.N.; MERINO, E.R.; LO, E. Hydro-sedimentology of the Paraguay River, from Vermelha Lake to the Miranda River confluence (Paraguay-Corumbá Fluvial Plain), Brazilian Pantanal wetland. 2017b. **Em desenvolvimento**
- MACEDO, H.A.; STEVAUX, J.C.; SILVA, A.; MERINO, E.R.; PUPIM, F.N.; BERGIER, I. Methodology for analysis of distribution and classification of the intensity of dequada fish kill events in the Pantanal wetland. **Geografia**, v.40, n. especial, p.163-176, ago. 2015.
- MARENGO, J.; SAMPAIO G.; ALVES, L. M. Climate change scenarios in the Pantanal. In: Ivan Bergier, Mario Luis Assine (Org.) **Dynamics of the Pantanal Wetlands in South America** – The Handbook of Environmental Chemistry, 2015, v.37,p.227-238. doi:10.1007/698\_2015\_357
- MARENGO, J.A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V.E.; FILIZOLA, N.P.; WAINER, I.C. Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climatology**, v.14, p.833–852, 2001.
- MARTINS, D. P.; STEVAUX, J.C.. Formas de leito e transporte de carga de fundo do Alto Rio Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.6, n.2, p.43-50, 2005.

- MAY, J.H.; VEIT, H. Late Quaternary paleosols and their paleoenvironmental significance along the Andean piedmont, Eastern Bolivia. **Catena**, v.78, n.2, p.100-116, 2009. DOI: 10.1016/j.catena.2009.03.003.
- MAY, J. H.; ZECH, R.; VEIT, H. Late Quaternary paleosoil– sediment-sequences and landscape evolution along the Andean piedmont, Bolivian Chaco. **Geomorphology**, v.98, n.1-2,p.34-54, 2008.
- MCGLUE, M. M.; SILVA, A.; ZANI, H.; CORRADINI, F. A.; PAROLIN, M.; ABEL, E. J.; COHEN, A. S.; ASSINE, M. L.; ELLIS, G. S.; TREES, M. A.; KUERTEN, S.; GRADELLA, F. S.; RASBOLD, G. G. Lacustrine records of Holocene flood pulse dynamics in the Upper Paraguay River watershed (Pantanal wetlands, Brazil). **Quaternary Research**, v.78, p.285–294, 2012. doi:10.1016/j.yqres.2012.05.015
- MEADE, R.H.. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. **Quaternary International**, v.21, p.29-39, 1994.
- MENDES, D. **Geocronologia de formas deposicionais e evolução da planície interleques do Rio Negro, Quaternário da Bacia do Pantanal**. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro-SP, 2014.
- MENDES, D.; ASSINE, M.L. Planície interleque do rio Negro, Pantanal Mato-Grossense. In: *Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA*. 13., 9 a 14 de Outubro de 2011, Armação de Búzios-RJ, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEQUA, 2013. p.1200-1204. Disponível em: [http://www.abequa.org.br/anais\\_2011.pdf](http://www.abequa.org.br/anais_2011.pdf).
- MERINO, E.R. **Evolução geomorfológica e mudanças paleohidrológicas na porção sul do Pantanal: a planície interleques do rio Negro e leques fluviais coalescentes**. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro-SP, 2016.
- MERINO, E.R.; ASSINE, M.L.; PUPIM, F.N. Estilos fluviais e evidências de mudanças ambientais na planície do rio Miranda, Pantanal. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.2, p.127–134, 2013.
- MERRITT, D.M.; WOHL, E.E.. Downstream hydraulic geometry and channel adjustment during a flood along an ephemeral, arid-region drainage. **Geomorphology**, v.52, n.3-4, p.165-180, 2003.
- METCALFE, S.E.; WHITNEY, B.S.; FITZPATRICK, K.A.; MAYLE, F.E.; LOADER, N.J.; STREET-PERROTT, F.A.; MANN, D.G. Hydrology and climatology at Laguna La Gaiba, lowland Bolivia: complex responses to climatic forcings over the last 25 000 years. **Journal of Quaternary Science**, v.29, n.3, p.289-300, 2014. DOI: 10.1002/jqs.2702
- MIALL, A.D. A review of the braided-river depositional environment. **Earth Science Review**, v.13, n.1, p.1-62, 1977.
- MIALL, A. D. **Fluvial Sedimentology**. Calgary, Alberta, Canada: Canadian Society of Petroleum Geologists, v.5, 1978, 859p.

- MIALL, A. D. **The Geology of Fluvial Deposits**. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- MOSBLECH, N.A.S.; BUSH, M.B.; GOSLING, W.D.; HODELL, D.; THOMAS, L.; VAN CALSTEREN, P.; CORREA-METRIO, A.; VALENCIA, B.G.; CURTIS, J.; VAN WOESIK, R.. North Atlantic forcing of Amazonian precipitation during the last ice age. **Nat. Geosci.**, v.5, p.817-820, 2012. DOI: 10.1038/geo1588.
- MURRAY, A.S.; WINTLE, A.G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. **Radiation Measurements**, v.32, p.57-73, 2000. PII: S13 5 0- 44 8 7( 99 )0 02 5 3-X.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.
- NANSON, G.C.; GIBLING, M.R. Anabranching and anastomosing rivers. In: A.S. Goudie (ed.) **Encyclopedia of geomorphology**, v.1. Routledge: London; p.23–25. 2004.
- NANSON, G.C.; KNIGHTON, A.D. Anabranching rivers: their cause, character and classification. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.21, p.217-239, 1996.
- NICHOLAS, A. P.; SANDBACH, S. D.; ASHWORTH, P. J.; AMSLER, M. L.; BEST, J. L.; HARDY, R. J.; LANE, S. N.; ORFEO, O.; PARSONS, D. R.; REESINK, A. J. H.; SMITH, G. H. S.; SZUPIANY, R. N.. Modelling hydrodynamics in the Rio Paraná, Argentina: An evaluation and inter-comparison of reduced-complexity and physics based models applied to a large sand-bed river. **Geomorphology**, v.169-170, p.192-211, 2012. doi:10.1016/j.geomorph.2012.05.014
- NICHOLAS, A.P.; ASHWORTH, P.J.; SAMBROOK SMITH, G.H.; SANDBACH, S.D.. Numerical simulation of bar and island morphodynamics in anabranching megarivers. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v.118, p.2019-2044, 2013. DOI: 10.1002/jgrf.20132, 2013
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climatology**, v.9, p.2464–2479,1996.
- NOVELLO, V.F.; CRUZ, F.W.; VUILLE, M.; STRÍKIS, N.M.; EDWARDS LAWRENCE, R.; CHENG, H.; EMERICK, S.; DE PAULA, M.S.; LI, X.; BARRETO, E.S.; KARMANN, I.; SANTOS, R.V.. A high-resolution history of the South American Monsoon from Last Glacial Maximum to the Holocene. **Scientific Reports**, v.7, n.44267, 2017. DOI: 10.1038/srep44267.
- ORIOLO, Á.L.; FILHO, Z.P.A.; OLIVEIRA, A.B. Pedologia - Folha SE.21 Corumbá e parte da folha SE.20. In: **Projeto RADAMBRASIL**. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro-RJ: MME/SG, 1982, v.27, p.225-328.
- PAOLA, C. Braided river. In: Andrew S. Goudie (Ed.). **Encyclopedia of Geomorphology**. New York: Routledge, 2004. p.98-101

- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; BATES, P.D.; BAUGH, C. The influence of vertical water balance on modelling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics. **Hydrological Processes**. v.28, n.10, 2014. DOI: 10.1002/hyp.9897
- PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.; PADOVANI, C.R. Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). **Hydrological Processes**, v.25, p.1498-1516, dez-2010.
- PINTO, N.L.S. Manipulação dos dados de vazão. In: Nelson L. de Souza Pinto, Antonio Carlos Tatit Holtz, José Augusto Martins, Francisco Luiz Sibut Gomide (eds.) **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, p.167-176, 1976.
- POR, F.D. **The Pantanal of Mato Grosso (Brazil) - World's Largest Wetlands**. Dordrecht, The Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1995, 122p.
- PUPIM, F.N. **Geomorfologia e paleo-hidrologia dos megaleques dos rios Cuiabá e São Lourenço, Quaternário da Bacia do Pantanal**. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) - UNESP, Rio Claro-SP, 2014, 109p.
- PUPIM, F.N.; ASSINE, M.L.; MERINO, E.R.; MACEDO, H.A.; SILVA, A. A planície interleques do rio Piquiri, bacia do Pantanal. In: *Simpósio de Geotecnologias no Pantanal – GEOPANTANAL*, 5. 22 a 26 de novembro 2014, Campo Grande, MS. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2014. p.848-857. CD rom.
- PUPIM, F.N.; ASSINE, M.L.; SAWAKUCHI, A.O. Late Quaternary Cuiabá megafan, Brazilian Pantanal: Channel patterns and paleoenvironmental changes. **Quaternary International**, v.438, Parte A, p.108-125, 2017. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.01.013.
- REBOUÇAS, A.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (organizadores). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.
- REESINK, A. J. H.; ASHWORTH, P. J.; SAMBROOK SMITH, G. H.; BEST, J. L.; PARSONS, D. R.; AMSLER, M. L.; HARDY, R. J.; LANE, S. N.; NICHOLAS, A. P.; ORFEO, O.; SANDBACH, S. D.; SIMPSON, C. J.; SZUPIANY, R. N.. Scales and causes of heterogeneity in bars in a large multi-channel river: Rio Parana, Argentina. **Sedimentology**, v.61, n.4, p.1055-1085, 2014. DOI: 10.1111/sed.12092
- SAWAKUCHI, A.O.; KALCHGRUBER, R.; GIANNINI, P.C.F.; NASCIMENTO Jr., D.R.; GUEDES, C.C.F.; UMISED, N.K.. The development of blowouts and foredunes in the Ilha Comprida barrier (Southeastern Brazil): the influence of Late Holocene climate changes on coastal sedimentation. **Quaternary Science Reviews**, v.27, p.2076-2090, 2008.

- SHUKLA, U. K.; SINGH, I.B.; SHARMA, M.; SHARMA, S. A model of alluvial megafan sedimentation: Ganga Megafan. **Sedimentary Geology**, v.144, n.3-4, p.243-262, 2001.
- SILVA, A. **Geomorfologia do megaleque do rio Paraguai, Quaternário do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil**. Tese de Doutorado (Geociências e Meio Ambiente) - UNESP, Rio Claro-SP, 2010.
- SILVA, R.C.V.; WILSON, G. **Hidráulica Fluvial**. Rio de Janeiro: COPFE/UFRJ. 2005, 256p.
- SINGH, V.P.; YANG, C.T; DENG, Z.Q. Downstream hydraulic geometry relations: 1. Theoretical development. **Water Resource Research**, v.39, n.12, p.1337, 2003. doi:10.1029/2003WR002484.
- SINHA, R.; LATRUBESSE, E.; NANSON, G.. Quaternary fluvial systems of tropics: major issues and status of research. **Palaeogeography, palaeoclimatology palaeoecology**, v.356-357, p.1-15, 2012. DOI: 10.1016/j.palaeo.2012.07.024
- SMITH, L. M. Fluvial geomorphic features of the Lower Mississippi alluvial valley. **Engineering Geology**, v.45, p.139-165, 1996.
- SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; ASSINE, M. L. Areiais e lagoas do Pantanal, Brasil: herança paleoclimática? **Revista Brasileira de Geociências**, v.33, n.2, p.211-224, 2003.
- SOHN, M. F.; MAHAN, S.A.; KNOTT, J.R.; BOWMAN, D.D. Luminescence ages for alluvial-fan deposits in Southern Death Valley: Implications for climate-driven sedimentation along a tectonically active mountain front. **Quaternary International**, v.166, p.49-60, 2007.
- SOUZA, C. A. **Dinâmica do corredor fluvial do rio Paraguai entre a cidade de Cáceres e a estação ecológica da ilha de Taiamã - MT**. Tese de Doutorado – UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- STEVAUX, J.C.; MARTINS, D.P.; MEURER, M.. Changes in regulated tropical rivers: the Paraná River downstream Porto Primavera Dam, Brazil. **Geomorphology**, v.113, n.3-4, p.230-238, 2009.
- STEWARTSON, M.. Hydraulic geometry of stream reaches. **Journal of Hydrology**, v.306, n.1-4, p.97-111, 2005.
- THOMPSON, L.G.; MOSLEY-THOMPSON, E.; HENDERSON, K.A. Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. **Journal of Quaternary Science**, v.15, n.4, p.377–394, 2000.
- TRICART, J.. El Pantanal: un ejemplo del impacto geomorfológico sobre el ambiente. **Informaciones Geográficas** (Chile), v.29, p.81-97, 1982.
- TUROWSKI, J.M.; HOVIUS, N.; WILSON, A.; HORGAN, M.J. 2008. Hydraulic geometry, river sediment and the definition of bedrock channels. **Geomorphology**, v.99, n.1-4, p.26-38, 2008.

- USSAMI, N.; SHIRAIWA, S.; DOMINGUEZ, J.M.L. Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge: Pantanal wetland, SW Brazil. **Tectonics**, v.18 n.1, p.25-39, 1999.
- VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part I: bed load transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.110, n.10, p.1431-1456, out, 1984.
- WANG, X.; EDWARDS, R. L.; AULER, A. S.; CHENG, H.; KONG, X.; WANG, Y.; CRUZ, F. W.; DORALE, J. A.; CHIANG, H-W. Hydroclimate changes across the Amazon lowlands over the past 45,000 years. **Nature Letter Research**, v.541, p.204-219, 2017. doi:10.1038/nature20787.
- WHITNEY, B. S.; MAYLE, F. E.; PUNYASENA, S. W.; FITZPATRICK, K. A.; BURN, M. J.; GUILLEN, R.; CHAVEZ, E.; MANN, D.; PENNINGTON, R. T.; METCALFE, S. E.. A 45 kyr palaeoclimate record from the lowland interior of tropical South America. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.307, p.177-192, 2011. doi:10.1016/j.palaeo.2011.05.012
- WINTLE, A.G.; MURRAY, A.S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. **Radiation Measurements**, v.41, p.369-391, 2006. doi:10.1016/j.radmeas.2005.11.001
- WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. **Journal of Geology**. v.68, n.1, p.54-74, 1960.
- ZANI, H. **Mudanças morfológicas na evolução do megaleque do Taquari: uma análise baseada em dados orbitais**. Dissertação de Mestrado (Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 2008, 85p.
- ZANI, H.; ASSINE, M.L.; SILVA, A.; CORRADINI, F.A. Redes de drenagem distributárias e formas deposicionais no megaleque do Taquari, Pantanal Mato-Grossense: Uma análise baseada no processamento de dados SRTM. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.10, p.23-28, 2009.
- ZANI, H.; ASSINE, M.L.; McGLUE, M.M. Remote sensing analysis of depositional landforms in alluvial settings: Method development and application to the Taquari megafan, Pantanal (Brazil). **Geomorphology**, v.161-162, p.82-92, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.04.003.