UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

APLICAÇÃO DE GPR NO ESTUDO DE SUCESSÕES FLUVIAIS QUATERNÁRIAS NO MEGALEQUE DO TAQUARI, BACIA DO PANTANAL

Rodrigo Diego Derubeis

Dissertação apresentada ao Programa de Geociências Geoquímica e Geotectônica no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geotectônica

Orientador: Professor Doutor Renato Paes de Almeida

São Paulo - Brasil 2018 Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

> Derubeis, Rodrigo Diego APLICAÇÃO DE GPR NO ESTUDO DE SUCESSÕES FLUVIAIS QUATERNÁRIAS NO MEGALEQUE DO TAQUARI, BACIA DO PANTANAL / Rodrigo Diego Derubeis; orientador Renato Paes de Almeida. -- São Paulo, 2018. 103 p.'

> Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2018.

1. Radar de Penetração do Solo. 2. Radar fácies. 3. Sistemas fluviais. 4. Pantanal. I. Paes de Almeida, Renato, orient. II. Título. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

APLICAÇÃO DE GPR NO ESTUDO DE SUCESSÕES FLUVIAIS QUATERNÁRIAS NO MEGALEQUE DO TAQUARI, BACIA DO PANTANAL

RODRIGO DIEGO DERUBEIS

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

Dissertação de Mestrado

Nº 809

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Renato Paes de Almeida

Dr. Vagner Roberto Elis

Dra. Milene Fornari

Dr. Vinicius Hector Abud Louro

São Paulo - Brasil 2018

A minha esposa Vanessa, pelo apoio e amor durante este processo, e ao meu filho Raul Francisco, que veio para nos alegrar!

Agradecimentos

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, e à FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelos suportes financeiros que viabilizaram esta pesquisa.

À Universidade de São Paulo, ao Instituto de Geociências, ao Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica e aos seus funcionários, por possibilitarem a pesquisa. Ao Samuca, pelo apoio técnico na aquisição dos dados de campo.

Ao professor orientador Renato Paes de Almeida, pelos ensinamentos, apoio, confiança, orientação e atenção.

Aos professores Fábio Taioli, Maurício Guerreiro dos Santos e Mario Luis Assine, pelos ensinamentos, indicações e apoio.

Aos amigos da pós-graduação orientandos do professor Renato, pelo apoio, amizade e troca de conhecimentos em vários momentos, em especial Larissa Tamura e Ariel.

A minha família, pelo amor, amizade, incentivo e companheirismo: Vanessa, Maria Isabel, Alex, Luana, Fábio, Alessandra e Tenório. Aos meus amigos e amigas, pela amizade, incentivo, companheirismo e auxílios: Wesley, Requejo, Lívia, Fernanda, Bruno, Neto e Sumida.

Resumo

O Pantanal é uma área mundialmente conhecida por ser uma das maiores planícies com alagamentos sazonais do mundo. Do ponto de vista de seus sistemas deposicionais, é uma área importante na caracterização de sistemas fluviais distributivos, característicos de áreas subsidentes e com grande relevância na interpretação do registro estratigráfico de sistemas fluviais em bacias sedimentares. Entretanto, os aspectos temporais da evolução dos sistemas fluviais do Pantanal são ainda pouco investigados, sendo ainda mais escassos os estudos com abordagem de investigações de sua subsuperfície. Como forma de contribuir para a compreensão da evolução temporal dos sistemas fluviais na região, o presente estudo apresenta os resultados de levantamentos de Radar de Penetração do Solo (GPR - Ground Penetrating *Radar*) e interpretação de radar fácies no Megaleque do Rio Taquari, no lobo meandrante do rio de mesmo nome, no Pantanal. Como resultado, após o processamento das informações coletadas, foram selecionadas nove seções GPR representativas do sistema, nas quais foram identificadas três radar fácies. Através da interpretação destas, foi possível identificar geometrias deposicionais em profundidades distintas do padrão formado pelos sistemas atuais, interpretadas como um sistema entrelaçado possivelmente de maior vazão que o atual e que implicam em transformações no sistema fluvial do rio Taquari no Quaternário, possivelmente devido a mudanças climáticas.

Palavras chaves: Radar de Penetração do Solo; Radar fácies; Sistemas fluviais; Pantanal.

Abstract

The Pantanal is internationally recognized as one of the largest seasonally flooded areas in the world. From a depositional systems point of view, it is important in the characterization of distributive fluvial systems, typical of subsiding areas and bearing great relevance for the interpretation of the fluvial rock record preserved within sedimentary basins. Despite that, the temporal aspects of the evolution of the fluvial systems in Pantanal are still poorly investigated, and studies based on subsurface surveys are even more scarce. As a means to contribute for the understanding of the fluvial systems evolution in the region, this dissertation presents the results of *Ground Penetrating Radar* (GPR) surveys and radar facies interpretation in the Taquari river megafan, specifically in the meandering lobe of the homonymous river in the Pantanal. After data processing, nine GPR sections representative of the system were selected, in which three radar facies were identified. Their interpretation lead to the identification of subsurface depositional geometries which are distinct from the modern day patterns, interpreted as a braided system possibly with greater discharge than the modern meandering river. This implies in changes in the Taquari fluvial system in the Quaternary, probably due to climate change.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Radar facies; Fluvial systems; Pantanal

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1. Aspectos Gerais9
1.1 Introdução9
1.2 Objetivos11
2. Contextualização da Pesquisa12
2.1 Aspectos Geológicos12
2.1.1 Panorama Geológico12
2.1.2 Formação da Bacia do Pantanal13
2.1.3 Bacia Sedimentar do Pantanal15
2.1.4 Megaleque do Taquari
2.2 Radar de Penetração do Solo (GPR – Ground Penetrating Radar)24
2.2.1 Contextualização do Método GPR24
2.2.2 Fundamentos Teóricos
2.3 Técnica de Aquisição37
2.4 Revisão de Estudos em Ambientes Fluviais e Aluvial Utilizando o Método GPR42
2.5 Estratigrafia de Radar Fácies45
3. Aspectos Específicos
3.1 Localização
3.2 Aquisição55
3.3 Processamento

4. Resultados.	60
4.1 Radar Fácies	60
4.2 Descrição e Interpretação das Seçõesa	64
5. Discussão	82
5.1 Comparação com Estudos Realizados no Rio Taquari e em Outros Rios	82
5.2 Possíveis Mudanças Climáticas Responsáveis Pelas Alterações do Amb Deposicional	iente 85
6. Conclusão	89
Referências Bibliográficas	90

Lista de Figuras

Figura 2.1.2-2: Modelo da evolução geológica do Pantanal, início da bacia durante o Paleógeno (Assine et al., 2016)......15

Figura 2.1.3-2: Espessura da Formação Pantanal (modificado de Assine, 2003).....17

Figura 2.1.4-3: Divisão do Pantanal em sub-regiões (Padovani, 2010)22

Figura 2.2.2-1: Decaimento da amplitude modificado de Annan(2001)30

Figura 2.3-2: a – Radargrama resultante da plotagem sequencial de traços individuais de pontos de levantamento adjacentes. São indicados a onda aérea, a onda direta do solo e as reflexões primárias. b – Percursos da onda entre as antenas transmissora e receptora, para a onda de ar, a onda do solo, a onda lateral e a onda refletida (modificado de Neal, 2004).......38

 Figura 2.3-4: Radargrama de uma sondagem de veocidades feita com antenas de 100 MHz

 (Huisman, 2003)

Figura 3.1-5: Imagem da região onde foram realizadas as aquisições (ampliação da região azul da imagem 3.1-3), com indicação do local das seções GPR com setas laranjas, indicação do local das seções WARR e trado com estrelas vermelhas e estradas locais em amarelo......53

Figura 3.2-1 - Antenas transmissora e receptora da IDS de 100MHz, utilizadas neste estudo.55

Figura 3.2-2: Imagens de aquisições realizadas em campo e indicações dos equipamentos que constituem o método GPR: Antenas, odômetro, unidade de controle (DAD) e notebook.......56

Figura 4.2-1:a) Detalhe da localização da seção. b)	Imagem da seção A, com detalhes de
quatro trechos e suas respectivas radar fácies	

Lista de Tabelas

Tabela 2.1.4-1: Vazões mensais e anuais das estações Coxim e Porto Rolon (A.N.A., 2004)2	1
Tabela 2.2.2-1: Exemplos de valores das propriedades elétricas (Neal, 2004)3	1
Tabela 2.2.2-2: Frequência e profundidade de penetração (Porsani, 1999)	4
Tabela 2.2.2-3: Frequência e Resolução vertical (Porsani, 1999)	1
Tabela 4.1-1: Padrões de radar fácies, organizados em código, descrição, interpretação e imagem de cada tipo de radar61	1

1. Aspectos Gerais

1.1 Introdução

Esta pesquisa teve o apoio da CAPES com a concessão de bolsa de mestrado. A aquisição dos dados geofísicos de GPR foi realizada por uma equipe composta por: Mestrando Rodrigo Diego Derubeis (Instituto de Geociências - IGc - USP), Técnico Samuel Pedro Egídio (Samuca), Prof. Dr. Mauricio Guereiro (Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – CECS, Universidade Federal do ABC – UFABC) e Prof. Dr. Fábio Taioli (Instituto de Geociências - IGc - USP), sendo este último o responsável pela aquisição, que foi financiada pelo projeto FAPESP 2014/0688992 denominado "Mudanças paleo-hidrológicas, cronologia de eventos e dinâmica sedimentar no Quaternário da Bacia do Pantanal", em desenvolvimento desde 2014 e coordenado pelo Prof. Dr. Mario Luis Assine (Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista UNESP - Rio Claro).

A pesquisa trata da identificação de geometrias deposicionais na Bacia do Pantanal no Quaternário, mais especificamente no Megaleque do Rio Taquari, com a utilização de Radar de Penetração do Solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*) em sucessões sotopostas aos depósitos do sistema fluvial ativo, e das implicações para a evolução desse sistema.

Sob o ponto de vista geológico, o Pantanal é uma ampla área subsidente (Ussami, 1999) na qual predominam sistemas deposicionais fluviais da Bacia do Rio Paraguai, incluindo amplas planícies de inundação e cinturões de canais dos principais rios. Nessa área, é marcante a presença de megaleques aluviais dos principais tributários do Rio Paraguai, destacando-se os rios São Lourenço e Taquari. Assim, a região compõe uma das maiores planícies com alagamentos sazonais do mundo, com amplas planícies inundáveis, presença de lagos permanentes e temporários e ciclos de cheias periodicamente regulares.

Os sistemas fluviais do Pantanal são altamente dinâmicos, registrando mudanças ambientais nas últimas décadas (Assine, 2003), como as alterações dos cursos dos rios e a variação da vazão. No caso específico do Rio Taquari, onde foram coletados os dados deste estudo, também observa-se, em um período recente, alterações ao longo de seu curso e variações de sua vazão, que possui média anual no período de 1966 a 2003 de 320 m³/s, na

estação fluviométrica de Coxim localizada na cidade homônima, próxima de onde foram coletado os dados. Essa dinâmica relaciona-se aos padrões radiais de canais reliquiares e ativos encontrados nos megaleques. Contudo, a dinâmica histórica pode não refletir os padrões de variação em escala de tempo mais longa.

Os aspectos temporais da evolução desses sistemas ao longo do Quaternário são ainda pouco investigados e são particularmente raros os estudos com abordagem de investigações de sua subsuperfície. Como forma de contribuir para a compreensão da evolução temporal dos sistemas fluviais na região, o presente estudo apresenta os resultados de levantamentos de Radar de Penetração do Solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*) e interpretação de radar fácies no Megaleque do Rio Taquari, no lobo meandrante do rio de mesmo nome, no Pantanal, com o objetivo de identificar geometrias deposicionais em profundidade e de testar a hipótese de variações significativas nos padrões de canais e barras ao longo do tempo geológico.

A presente dissertação está organizada em seis capítulos: o primeiro deles, intitulado "Aspectos Gerais", apresenta uma breve introdução da pesquisa, com informações sobre a sua realização, como o local de desenvolvimento, a justificativa, o método empregado e os objetivos; o segundo capítulo, "Contextualização da Pesquisa", aborda a geologia da área estudada, os procedimentos específicos do método empregado, a importância de outras pesquisas já realizadas com o mesmo método neste ambiente ou em ambientes semelhantes e a metodologia utilizada para a interpretação dos dados obtidos; no terceiro capítulo, "Aspectos Específicos", foram detalhados os locais de aquisição dos dados e a forma como foram obtidas as informações que posteriormente foram processadas com o software selecionado. No capítulo quatro, denominado "Resultados", são apresentadas as radar fácies identificadas, suas interpretações e as seções obtidas com o método empregado, processadas e interpretadas. No quinto capítulo, "Discussão", são apresentadas as análises e interpretação dos dados em termos das características dos sistemas responsáveis pelos elementos arquiteturais e limites litológicos identificados no quarto capítulo, enfatizando as diferenças entre os depósitos antigos e os sistemas atuais. Por fim, no sexto capítulo, "Conclusão", são sintetizados os dados e interpretações.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal investigar as estruturas sedimentares preservadas em subsuperfície em áreas selecionadas do Megaleque do Rio Taquari, afluente da margem esquerda do Rio Paraguai na região do Pantanal. Buscou-se testar a hipótese de modificações significativas nos estilos de canais e na arquitetura deposicional em decorrência das modificações climáticas do fim do Pleistoceno e do Holoceno. Para tanto, os objetivos parciais foram:

- Testar a eficácia da investigação geofísica de radar de penetração do solo (*Ground Penetrating Radar* GPR) na interpretação de geometrias deposicionais em subsuperfície no Pantanal, dada a grande variabilidade de resposta desse método em função das características do substrato.
- 2) Confirmada a eficiência do método na região, identificar estruturas sedimentares, elementos arquiteturais e limites litológicos, com base em interpretações de radar fácies, comparando três regiões de investigação e suas evoluções ao longo do tempo.

2. Contextualização da Pesquisa

2.1 Aspectos Geológicos

2.1.1 Panorama Geológico

A área deste estudo localiza-se no Pantanal, na região Centro-Oeste do Brasil. O Pantanal localiza-se entre as latitudes 16° a 22° Sul e longitude 55° a 59° Oeste, compreendendo parte do Brasil, da Bolívia e do Paraguai. É uma planície alagável de aproximadamente 135.000 km² da Bacia do Alto Paraguai (figura 2.1.1-1). A variação da altitude é próxima dos 100 m, de 80 m a 190 m acima do nível do mar, sendo interpretada como uma bacia interior, cercada por planaltos intemperizados de rochas sedimentares paleozoicas e cristalinas pré-cambrianas (figura 2.1.1-1). Constitui uma planície aluvial com regime hidrológico de cheias sazonais com drenagem ineficiente, que inundam nas estações do verão a outono (Assine e Soares, 2004).



Figura 2.1.1-1: Localização do Pantanal (Assine e Soares, 2004), com destaque para a região com altitude inferior a 200 m e a porção brasileira do Pantanal; bloco diagrama da Depressão do Alto Paraguai (Assine, 2010), com destaque para altitude inferior a 200 m (cores: cinza, azul e verde claro).

O Rio Paraguai é o principal da Bacia do Alto Paraguai, correndo de Norte a Sul de uma área deposicional aluvial. Esta região é constituída por sistemas de leques aluviais, planícies fluviais e planícies lacustres. Megaleques aluviais predominam na paisagem do Pantanal, sendo o leque do Rio Taquari o maior deles e um dos mais relevantes da região (Assine, 2003).

Segundo Ab'Sáber (2006), o cientista francês Francis Ruellan foi o primeiro a identificar na Depressão do Alto Paraguai a formação do Pantanal Mato-Grossense ocorrida durante o Quaternário. Através de relações entre as deformações antigas e modernas da plataforma brasileira, Ruellan procurou compreender os motivos dos arqueamentos de grande raio de curvatura, que culminaram no mosaico de áreas de abaulamentos ou depressões no dorso geral do escudo. Ele caracterizou a depressão pantaneira como uma *boutonnière*, escavada em terrenos pré-cambrianos, na área de fronteiras do Brasil com a Bolívia e o Paraguai, à margem noroeste da Bacia do Paraná.

2.1.2 Formação da Bacia do Pantanal

A formação da Bacia do Pantanal é atribuída a uma sequência de eventos, cujas transformações estão registradas nos sedimentos depositados, que podem ser melhor compreendidas nos megaleques aluviais. Isto ocorre pelo fato de os leques serem implicações do encadeamento de eventos de formação e abandono de lobos deposicionais, onde os lobos mais recentes truncam os abandonados. Esta sequência de eventos, que repete-se continuamente – formação, abandono e truncamentos –, pode ser reconstituída e compreendida temporalmente (Assine, 2003).

Não se sabe ao certo quando teve início a subsidência e o preenchimento da Bacia do Pantanal. Neste estudo, serão apresentados dois modelos da formação do Bacia do Pantanal. O primeiro modelo supõe que a bacia se originou no Período Neógeno. Assumindo que o embasamento da bacia é formado pela superfície Cuiabana, a gênese de sua formação se deu por esforços compressivos no orógeno andino a 2,5 Ma. Sendo adotado que a subsidência da Bacia do Pantanal aconteceu depois dos processos de pediplanação da região, o preenchimento com os depósitos silicicláticos e o início da bacia podem ser atribuídos a idades quaternárias (Ab'Saber, 1988; Ussami et al.,1999; Assine et al., 2016), (figura 2.1.2-1).



Figura 2.1.2-1: Modelo da evolução geológica do Pantanal, início da bacia durante o Neógeno (Assine et al., 2016).

O segundo modelo supõe que a bacia se originou no Paleógeno, já que os sedimentos mais antigos, localizados a aproximadamente 500 m de profundidade, coincidem com processos tectônicos de soerguimento e formação de bacia sucedidos no Sudeste brasileiro na Época do Eoceno e na fase de reativação tectônica andina. Através de correspondências cronológicas destes processos, tal modelo de evolução da bacia conjectura que esta se originou no Período Paleógeno, através de tectônica frágil, sendo que sua subsidência e sedimentação se iniciaram no Eoceno, juntamente com a ruptura da superfície Sul-Americana, ocorrida devido ao soerguimento e aos movimentos seculares de nível. Os vestígios desta superfície são admitidos como a base da bacia, estando logo abaixo de depósitos aluviais do Cenozoico (Assine et al., 2016), (figura 2.1.2-2).



Figura 2.1.2-2: Modelo da evolução geológica do Pantanal, início da bacia durante o Paleógeno (Assine et al., 2016).

2.1.3 Bacia Sedimentar do Pantanal

A Bacia sedimentar do Pantanal apresenta tectônica ativa, evidenciada por alterações na paisagem, devido a sua dinâmica sedimentar, cujas alterações são explicadas por eventos climáticos e tectonismos que se iniciaram na Época do Pleistoceno. Esta bacia é cercada por planaltos, sendo ao Norte os Planaltos de Guimarães e Parecis, ao Sul o de Bodoquena, ao Leste os de Maracajú-Campo Grande e Taquari-Itiquira e a Oeste o de Urucum-Amolar (Assine, 2003), (figura 2.1.3-1).

A Bacia sedimentar do Pantanal pode ser compreendida como uma depressão tectônica interior. No embasamento desta bacia predominam rochas metamórficas de baixo-grau e ígneas neoproterozoicas, denominado Grupo Cuiabá. No limite Oeste da bacia, sobre o embasamento, encontram-se rochas neoproterozoicas com baixo-grau de metamorfismo do Grupo Corumbá, que formam o Maciço de Urucum, representado pelo planalto de Urucum-Amolar. No limite oposto a Leste, sobre rochas magmáticas intrusivas, apresentam-se sequências paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná, que formam os planaltos de Maracajú-Campo Grande e Taquari-Itiquira (Assine, 2003), (figura 2.1.3-1).



Figura 2.1.3-1: Mapa Geológico. Unidades cronoestratigráficas: M= Meso-Proterozóico, N= Neo-Proterozóico, O = Ordoviciano, S = Siluriano, D = Devoniano, C = Carbonífero, P = Permiano, J =Jurássico, K = Cretáceo, T = Terciário, Q = Quaternário. Planaltos: 1 = Bodoquena; 2 = Maracajú-Campo Grande; 3 = Taquari-Itiquira; 4 = Guimarães; 5 = Parecis; 6 = Província Serrana; 7 = Urucum-Amolar (Assine, 2003).

A área de máxima deposição da Bacia sedimentar do Pantanal possui forma elíptica com o eixo maior com orientação Norte-Sul. Sua largura no eixo menor é de aproximadamente 200 km e a espessura do conjunto das camadas sedimentares possui valores de até 550 m nos pontos mais espessos, evidenciada no mapa de isópacas (figura 2.1.3-2). Os sedimentos que preenchem a bacia sedimentar do Pantanal são constituídos predominantemente de siliciclásticos, possuindo característica de afinamento textural para o topo, com prevalência de areias quartzosas finas e médias nas camadas superiores sobre arenitos grossos e conglomerados nas regiões mais profundas. Possuem camadas de tons vermelhos em diversas profundidades, devido à presença de óxido de ferro, que podem vir a formar lateritas (Assine, 2003 e Assine, 2015).



Figura 2.1.3-2: Espessura da Formação Pantanal (modificado de Assine, 2003).

A Bacia sedimentar do Pantanal pode ser entendida como resultado dos episódios compressivos no orógeno andino, devido às forças de distensão no arco flexural da Bacia de antepaís do Chaco (Assine, 2003). A subsidência da bacia é flexural, relacionada a falhas que se localizam a Oeste, Leste e centro da mesma. A Oeste, as falhas condicionam a bacia separando a planície do planalto de Urucum-Amolar, onde afloram rochas pré-cambrianas. No limite Leste da bacia, encontram-se abaixo dos sedimentos da Formação Pantanal, que localiza-se sobre o embasamento em *onlap* com orientação de Oeste-Leste, com a regressão das escarpas que delimitam os planaltos Maracajú-Campo Grande e Taquari-Itiquira. Na região central da bacia existem falhas ativas ligadas ao Lineamento Transbrasiliano, com orientação Nordeste-

Sudoeste, cruzando transversalmente toda a Bacia do Pantanal (figura 2.1.3-3), tornando a Bacia sedimentar do Pantanal sismicamente ativa e essas atividades podem ser relacionadas ao Lineamento Transbrasiliano (Assine, 2003).



Figura 2.1.3-3: Lineamento Transbrasiliano (Assine, 2003).

2.1.4 Megaleque do Taquari

A Bacia sedimentar do Pantanal possui sete megaleques aluviais: Taquari, Corixo Grande, Cuiabá, São Lourenço, Taboco, Aquidauana e Nabileque (Zani, 2008), (figuras 2.1.4-1). O Megaleque aluvial do Rio Taquari é o mais proeminente, devido as suas dimensões de aproximadamente 250 km de uma borda a outra, com formato praticamente circular e uma área de cerca de 50.000 km², o que representa 37% de toda a área do Pantanal. Sua altitude varia de 190 m a Leste próximo dos Planaltos para 85 m na sua base no Rio Paraguai a Oeste, determinando que seu gradiente topográfico seja em média de 36 cm/km. Sua topografia é comprovada através das curvas de nível (figura 2.1.4-2), que possui uma forma transversal côncava e um perfil longitudinal côncavo, propriedades típicas dos leques aluviais (Assine, 2003), (figura 2.1.4-2).



Figura 2.1.4-1: Megaleques fluviais que compõem o trato deposicional do Pantanal: 1= Taquari, 2= Cuiabá, 3= São Lourenço, 4 = Corixo Grande, 5 = Taboco, 6 = Aquidauana e 7 = Nabileque (modificado de Zani, 2008).

O Megaleque do Taquari pode ser subdividido em unidades morfológicas, sendo evidenciadas aqui as mais relevantes: o cinturão de meandramento, localizado na região superior do leque, o lobo deposicional atual, com sedimentação na região central até o extremo Oeste, e inúmeros lobos deposicionais abandonados, caracterizados por um conjunto intrincado de paleocanais (Assine, 2003), (figura 2.1.4-2).



Figura 2.1.4-2: Megaleque do Rio Taquari indicando curvas de nível, paleocanias, cinturão de meandramento, lobos atuais e lobos abandonados. Perfis topográficos de leques aluviais, modificado de Assine, 2003.

O Megaleque do Rio Taquari é alimentado pelo rio que o nomeou, possui bacia de drenagem nos planaltos de Maracajú-Campo Grande e Taquari-Itiquira, localizados a Leste do megaleque, com altitude aproximada de 800 m. A orientação de escoamento do rio é de Leste para Oeste, sua vazão média anual na estação fluviométrica de Coxim, localizada no início do cinturão meandrante, foi de 320 m³/s em 1966 e de 142 m³/s em 2003, e na estação fluviométrica de Porto Rolon, localizada dentro do lobo ativo, foi de 245m³/s em 1968 e de 128m³/s em 1993 (A.N.A., 2004), (tabela 2.1.4-1). Assume-se que houve redução na vazão do Rio Taquari, o que é entendido através das séries históricas de medidas das estações fluviométricas, e também porque podemos observar que nas cheias a vazão é significativamente menor na estação de

Porto Rolon, indicando que há perda de água para a planície de inundação (Assine, 2009 e Assine, 2003).

Rio e nome da estação	Cédiae e -	Vazões médias mensais em m ³ /s											<u>ດ ດ ຄ</u>	o 4	
	área (km²)	J	F	М	Α	М	J	J	Α	S	0	N	D	Vazõe média anuais	períoc de observ ção
Taquari	66870000	438 479	470	422	343	294	267	248	238	248	278	316	373	320	1966/
Coxim	27.040		479	455										142	2003
Taquari	66885000	271 279	070 170	200	24.0	250	8 248	220	220	9 225	241	250	261	245	1968/
Porto Rolon	32.285		219	280	269	258		239	229			250		128	1993

Tabela 2.1.4-1: Vazões mensais e anuais das estações Coxim e Porto Rolon (A.N.A., 2004)

O Rio Taquari percorre um trecho denominado cinturão de meandramento. Durante esse percurso, fica aprisionado em sua calha por aproximadamente 100 km, devido à formação de terraços marginais de aproximadamente 5 m em sedimentos mais antigos. A ação do rio contra as paredes que o aprisionam é a erosão nas regiões côncavas do meandro, expondo os ciclos fluviais gravados nos sedimentos com areias que vão afinando para o topo e também a presença de paleossolos. Já que o rio está aprisionado no cinturão de meandramento, ele não fornece quantidades significativas de água para a planície. Isto ocorre porque os raros processos de rompimento dos terraços ficam restritos ao cinturão de meandramento e a perda de água para a planície ocorre apenas no lobo deposicional atual (Assine, 2003).

O Pantanal também pode ser dividido em sub-regiões devido ao seu regime de inundações, de acordo com as fontes de água e unidades geomorfológicas. Esses padrões e características permitem que o Pantanal seja subdividido em 25 diferentes sub-regiões (Padovani, 2010 e Assine et al., 2015), (figura 2.1.4-3).



Figura 2.1.4-3: Divisão do Pantanal em sub-regiões (Padovani, 2010).

As seis sub-regiões que representam o Megaleque do Taquari são aqui explicitadas devido a sua relevância em relação aos locais estudados neste trabalho: Maracajú (6), Nhecolandia-Baixa (7), Nhecolandia-Alta (11), Taquari (9), Paiaguas (10) e Piquiri-Itiquira (12).

As sub-regiões de Maracajú e Piquiri-Itiquira são áreas de encostas, no limite Leste do Pantanal, onde estas se encontram na base da Serra do Pantanal e da Serra de São Jerônimo, Piquiri-Itiquira mais ao norte e Maracajú, mais ao sul. A sub-região de Maracajú possui vários riachos e um regime de inundações muito pobre, já Piquiri-Itiquira possui os rios Piquiri, Itiquira e Correntes que a cruzam e apresentam áreas inundáveis. A sub-região Piquiri-Itiquira possui orientação principal de drenagem Sudeste para Noroeste e apresenta uma bacia hidrográfica no planalto, enquanto Maracajú tem sentido principal de drenagem de Leste para Oeste e não possui bacia hidrográfica no planalto (Padovani, 2010). As sub-regiões de Paiaguas, Nhecolandia-Alta e Nhecolandia-Baixa são lobos deposicionais abandonados do leque aluvial do Rio Taquari, sendo a Nhecolandia-Baixa o lobo deposicional mais antigo e a Paiaguas, o mais recente. A paisagem da Nhecolandia-Baixa distingue-se por inúmeros lagos e salinas e não possui bacia hidrográfica no planalto. Já as sub-regiões de Paiaguas e Nhecolandia-Alta são caracterizadas por corixos e vazantes, que escoam as águas próximas ao Rio Taquari, que cruza essas sub-regiões em seu canal. A sub-região Paiaguas apresenta duas orientações principais de drenagem, sendo a predominante de Sudeste para Nordeste e de Leste para Oeste, enquanto que a sub-região de Nhecolandia-Alta possui orientação principal de drenagem de Sudeste para Nordeste (Padovani, 2010).

A sub-região do Taquari é o lobo deposicional atual do leque aluvial do Rio Taquari, caracterizando-se por grandes inundações e significativo processo deposicional, onde ocorre o transbordamento do rio. Trata-se de uma sub-região que possui bacia hidrográfica no planalto (Padovani, 2010).

2.2. Radar de Penetração do Solo (GPR – Ground Penetrating Radar)

2.2.1 Contextualização do Método GPR

Ground Penetrating Radar (ou GPR) é o termo geral aplicado às técnicas que consistem em aplicar ondas eletromagnéticas de alta frequência, na faixa de frequência de poucos mega-Hertz até giga-Hertz, para mapear estruturas e recursos enterrados na subsuperfície. O GPR foi aplicado inicialmente no mapeamento de estruturas da subsuperfície (Annan, 2001).

O primeiro uso de sinais eletromagnéticos para determinar a presença de objetos metálicos terrestres é atribuído a Hiilsmeyer em 1904. O trabalho de Hiilsenbeck em 1926 foi o primeiro a utilizar pulsos para determinar características de estrutura enterradas. As técnicas pulsadas foram desenvolvidas a partir da década de 1930 com objetivo de sondar profundidades consideráveis no gelo, água doce, depósitos de sal, areia do deserto e formações rochosas (Daniels, 2004). A primeira pesquisa de GPR foi realizada na Áustria em 1929 para conhecer a profundidade de uma geleira. No final da década de 1950, radares da Força Aérea dos EUA foram usados para investigar a profundidade do gelo na Groenlândia. Isso provocou estudos sobre a capacidade do GPR em pesquisar a subsuperfície não só para o gelo, mas também para o mapeamento de propriedades do subsolo e do lençol freático. Em 1967, um sistema como o idealizado originalmente para pesquisar a geleira em 1929 foi proposto e construído para o programa espacial "Experiência das Propriedades Elétricas da Superfície da Lua" na Apollo 17, gerando renovação do interesse pelo método GPR. Antes do início da década de 1970, para aplicar a metodologia GPR, era necessário construir o seu próprio equipamento, mas em 1972 Rex Morey e Art Drake iniciaram a Geophysical Survey Systems Inc., começando a vender sistemas comerciais de GPR, impulsionando as aplicações, publicações e pesquisas do método (Olhoeft, 2002).

Somente na década de 1980 os sistemas GPR se tornaram viáveis comercialmente, devido à disponibilidade e à aquisição de dados digitais, o que culminou, a partir da década de 1990, em um grande interesse no GPR, com o aumento progressivo de publicações. Muitas dessas publicações eram a respeito de aplicações geológicas do método GPR, mais especificamente empregadas à sedimentologia para reconstruir os ambientes deposicionais pretéritos e a natureza dos processos sedimentares em uma variedade de ambientes deposicionais, em pesquisas hidrogeológicas e para auxiliar nos estudos de reservatórios análogos de hidrocarbonetos (Neal, 2004).

Atualmente, a utilização do método GPR em estudos geocientíficos é explicada não somente pela sua maior disponibilidade desde a década de 1980, mas também pelas suas especificidades, como: rapidez e simplicidade na obtenção dos dados; possibilidade de obter informações da subsuperfície distante de afloramentos ou furos de sondagem; característica não destrutiva; alta resolução; e as analogias que possui com a sísmica, uma metodologia já consolidada (Neal, 2004). Neste projeto, o método GPR é aplicado a processos sedimentares em ambiente deposicional fluvial.

2.2.2 Fundamentos Teóricos

Os sinais que o método GPR irradia para a subsuperfície são ondas eletromagnéticas e a física destas é descrita matematicamente pelas equações de Maxwell. As relações constitutivas que medem as propriedades do meio em que essas ondas se propagam são os fundamentos para a descrição das relações quantitativas dos sinais GPR (Annan, 2001).

Os campos eletromagnéticos e as propriedades relacionadas são expressos por:

$$\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{E} = -\frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} \tag{2-1}$$

$$\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{H} = \overrightarrow{J} + \frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t} \tag{2-2}$$

$$\nabla \bullet \vec{D} = q \tag{2-3}$$

 $\nabla \bullet \vec{B} = 0 \tag{2-4}$

Sendo:

 $\overrightarrow{E} \rightarrow$ vetor força do campo elétrico. $\overrightarrow{H} \rightarrow$ vetor intensidade do campo magnético. $\overrightarrow{D} \rightarrow$ vetor deslocamento elétrico. $\overrightarrow{B} \rightarrow$ vetor densidade do fluxo magnético. $\overrightarrow{J} \rightarrow$ vetor densidade da corrente elétrica. $\overrightarrow{q} \rightarrow$ densidade de carga elétrica.

 $t \rightarrow$ tempo.

A lei de Faraday apresentada na equação (2-1) pode ser entendida por um campo magnético (\overrightarrow{B}) variável no tempo (t) que faz com que as cargas elétricas se movam, o que implica a presença de um campo elétrico \overrightarrow{E} .

A lei de Ampère indicada na equação (2-2) pode ser resumida por uma corrente elétrica que produz um campo magnético.

A lei de Gauss para campos elétricos exibida na equação (2-3) pode ser percebida como o deslocamento elétrico (\overrightarrow{D}) que tem seu começo ou fim em uma carga elétrica e, assim, os campos elétricos devem formar ciclos fechados, associados ao fluxo elétrico que atravessa qualquer superfície gaussiana fechada com as cargas elétricas.

A lei de Gauss para campos magnéticos exposta na equação (2-4) pode ser apresentada da seguinte forma: como não há cargas magnéticas livres, os campos magnéticos devem formar ciclos fechados e, como consequência, o fluxo magnético é zero (Annan, 2001).
As relações constitutivas apresentam parâmetros importantes das características do meio, como: permissividade dielétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética (Cassidy, 2009; Annan, 2001 e Reynolds, 1997).

E são as seguintes:

$$\overrightarrow{D} = \varepsilon_r \overrightarrow{E}$$
(2-5)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$
(2-6)

$$\overrightarrow{B} = \mu_{\gamma} \overrightarrow{H}$$
(2-7)

Sendo:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{T}} \rightarrow \text{permissividade dielétrica relativa, } \mathcal{E}_{\mathcal{T}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Sendo \mathcal{E}_0 a permissividade dielétrica no vácuo.

 $\sigma
ightarrow {
m condutividade}$ elétrica.

 $\mu_r \rightarrow$ permeabilidade magnética relativa, $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

Sendo μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo.

Nas equações das relações constitutivas, as propriedades são mostradas como constantes simples, sendo isto válido para o caso ideal de um meio uniforme e homogêneo sem perdas, isotrópico (Cassidy, 2009).

A permissividade dielétrica é a capacidade de um meio armazenar e liberar energia eletromagnética sob a forma de carga elétrica e pode ser interpretada como a competência de armazenamento de capacitores elétricos (Cassidy, 2009).

A condutividade elétrica é a capacidade que um meio possui para transferir cargas elétricas livres devido à influência de um campo aplicado. Os elétrons livres são as cargas transferidas nos metais, enquanto que ânions e cátions dissolvidos são as cargas transferidas nos fluidos (Cassidy, 2009).

A permeabilidade magnética pode ser entendida como análogo magnético da permissividade dielétrica, sendo uma quantidade da energia do campo magnético armazenada e perdida através da magnetização induzida (Cassidy, 2009). A permeabilidade magnética raramente é de grande importância no método GPR (Annan, 2001), mas nos minerais ferromagnéticos representa um efeito relevante na velocidade da onda GPR e na atenuação do sinal (Cassidy, 2009).

A natureza da propagação da onda dos campos EM é explicada supondo o meio uniforme simples isotrópico, independente de frequência e linear. As equações de Maxwell explicam que os campos elétricos em mudança criam campos magnéticos que, por sua vez, induzem campos elétricos. Sucessivamente, este ciclo contínuo de um campo induzindo outros resulta em campos que se deslocam através do meio, fazendo com que os campos possam espalhar-se ou se propagar como ondas. É interessante para o método GPR o caráter ondulatório da resposta, manipulando as equações de Maxwell para suprimir o campo magnético. Isto é feito utilizando a natureza de ciclos fechados do campo magnético, podendo ser explicitado em termos do campo elétrico (Annan, 2001). Aplicando o rotacional e substituindo (2-7) em (2-1), temos:

$$\nabla \mathbf{x} \left(\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{E} \right) = -\nabla \mathbf{x} \left(\frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{B} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \mathbf{x} \, \mu_r \overrightarrow{H} \right)$$
(2-8)

Organizando a equação:

$$\nabla \mathbf{x} \left(\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{E} \right) = -\mu_r \frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{H} \right) \tag{2-9}$$

Usando a Equação (2-2) na (2-9) temos:

$$\nabla \mathbf{x} \left(\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{E} \right) = -\mu_r \frac{\partial}{\partial t} \left(\overrightarrow{J} + \frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t} \right)$$
(2-10)

Usando as Equação (2-6) e (2-5) na (2-10) temos:

$$\nabla \mathbf{x} \left(\nabla \mathbf{x} \, \overrightarrow{E} \right) = -\mu_r \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma \overrightarrow{E} + \frac{\partial \varepsilon_r \overrightarrow{E}}{\partial t} \right)$$
(2-11)

Assim temos a equação que representa a onda eletromagnética (Annan 2001):

$$\nabla^2 \mathbf{x} \, \overrightarrow{E} + \mu_r \sigma \frac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t} + \mu_r \varepsilon_r \frac{\partial^2 \overrightarrow{E}}{\partial t^2} = \mathbf{0}$$
(2-11)

A velocidade (v) de uma onda eletromagnética é uma função da sua frequência (f), da velocidade da luz (c) no vácuo, da permissividade dielétrica relativa (ε_r) , da condutividade elétrica (σ) e da permeabilidade magnética relativa (μ_r) sendo definida como (Neal, 2004):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \,\mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma/\omega\varepsilon)^2}}{2}}} \tag{2-12}$$

Onde: $\sigma/_{\omega\varepsilon}$ é um fator de perda, sabendo que $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular. Assim, em meios com pouca perda de sinal, a importância de condutividade elétrica (σ) no método GPR é mínima e presume-se que $\sigma/_{\omega\varepsilon} \approx 0$. Como no método GPR se tem poucas informações da resposta magnética, a relevância de μ_r é desprezada, sendo atribuído o valor correspondente do meio não magnético $\mu_r = 1$. Assim, obtemos (Neal, 2004):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2-13}$$

A onda eletromagnética, ao propagar-se através do meio, apresenta um decaimento exponencial em sua amplitude (*A*), expressa pela equação (Neal, 2004):

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \tag{2-14}$$



Figura 2.2.2-1: Decaimento da amplitude modificado de (Annan, 2001)

Sendo:

 $A_0 \rightarrow$ amplitude inicial da onda.

 $\alpha \rightarrow$ constante de atenuação, pode ser explicitada para ambientes com baixa perda por:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$
(2-15)

 $x \rightarrow$ distância percorrida.

Observa-se que em ambientes sedimentares a velocidade da onda (v) varia inversamente à permissividade dielétrica relativa (ε_r) e a constante de atenuação (α) varia diretamente à condutividade elétrica (σ) , evidenciado pela Tabela 2.2.2-1. Essas relações de variações podem ser justificadas pela quantidade de água presente no meio, que exerce uma grande influência nas propriedades dielétricas do meio geológico, mas essas relações somente são válidas para meios com ausências de elementos com alta condutividade (Neal, 2004).

Medium	Relative dielectric permittivity (ε_r)	Electromagnetic-wave velocity (m ns ⁻¹)	Conductivity (mS m^{-1})	Attenuation (dB m ⁻¹)
Air	1	0.3	0	0
Fresh water	80	0.03	0.5	0.1
Seawater	80	0.01	30,000	1000
Unsaturated sand	2.55-7.5	0.1-0.2	0.01	0.01 - 0.14
Saturated sand	20-31.6	0.05-0.08	0.1 - 1	0.03 - 0.5
Unsaturated sand and gravel	3.5-6.5	0.09-0.13	0.007 - 0.06	0.01 - 0.1
Saturated sand and gravel	15.5-17.5	0.06	0.7-9	0.03 - 0.5
Unsaturated silt	2.5-5	0.09-0.12	1 - 100	1 - 300
Saturated silt	22-30	0.05-0.07	100	1 - 300
Unsaturated clay	2.5 - 5	0.09-0.12	2 - 20	0.28 - 300
Saturated clay	15-40	0.05-0.07	20-1000	0.28 - 300
Unsaturated till	7.4-21.1	0.1-0.12	2.5 - 10	
Saturated till	24-34	0.1-0.12	2-5	
Freshwater peat	57-80	0.03-0.06	<40	0.3
Bedrock	4-6	0.12-0.13	$10^{-5} - 40$	$7 \times 10^{-6} - 24$

Tabela 2.2.2-1: Exemplos de valores das propriedades elétricas (Neal, 2004).

Ao se propagar, a onda eletromagnética se depara com uma mudança relevante nas propriedades da subsuperfície de permissividade dielétrica relativa (ε_r), da condutividade elétrica (σ) e da permeabilidade magnética (μ_r). Esse processo causa a reflexão de certa quantidade de energia contida na onda, sendo essa quantidade de energia refletida proporcional à amplitude das mudanças das propriedades (Reynolds, 1997). Sendo o coeficiente de reflexão (R) a expressão que descreve a quantidade de energia refletida, em relação à amplitude do sinal (Neal, 2004) será:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} - \sqrt{\varepsilon_{r_1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r_2}} + \sqrt{\varepsilon_{r_1}}}$$
(2-16)

Assumindo que ε_{r1} e ε_{r2} são as permissividades dielétricas relativas de camadas subsequentes.

Outro parâmetro relevante é o *skin depth*, que é empregado para inferir uma estimativa da profundidade que a onda é capaz de viajar pelo meio, isto até a amplitude ser diminuída pelo fator de 1/e ou H 37% (Reynolds, 1997), devido à atenuação do sinal, sendo por dispersão, expressa por (Cassidy, 2009):

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \tag{2-17}$$

A profundidade da penetração da onda eletromagnética do método GPR é relacionada com a perda de energia que ela sofre enquanto se propaga. Essas perdas podem ser atribuídas a múltiplos fatores, sendo os principais (Reynolds, 1997):

1 - Perda referente ao efeito de acoplamento das antenas e do solo;

2 - Perdas devido à transmissão e reflexão resultantes das mudanças de interfaces;

3 - Perda por dispersão provocada em virtude de objetos com dimensões semelhantes ao comprimento de onda, gerando ruídos;

4 - Perda provocada pela absorção da energia EM;

5 - Perdas por relaxação dielétrica da água (fenômeno que ocorre devido à onda do método GPR gerar um campo eletromagnético que força as moléculas da água, que possuem característica de dipolo elétrico, a tentarem alinhamento, ocasionando que as moléculas girem e colidam com outras moléculas, liberando calor e absorvendo energia);

6 - Perdas em virtude do espalhamento geométrico, a energia se espalha causando uma redução por unidade de área.

Tais fatores são explicitados na figura 2.2.2-2:



Figura 2.2.2-2: Fatores que contribuem para as perdas de energia da onda eletromagnética (Reynolds, 1997).

Assim, pode ser afirmado que a profundidade de penetração está relacionada com as perdas de energia para uma frequência específica, o que significa que quanto maior o valor da frequência de operação utilizada nas antenas, menor será a profundidade de penetração (Neal, 2004), como observado na tabela 2.2.2-2:

Frequência central (MHz)	Profundidade máxima de penetração	
	(m)	
10	50	
25	40	
50	30	
100	25	
200	4	
400	2	
500	1,5	
1000	1	

Tabela 2.2.2-2: Frequência e profundidade de penetração (Porsani, 1999).

A resolução vertical está relacionada com a frequência utilizada pela antena, sendo que a resolução vertical aumenta quando a frequência aumenta (a capacidade de identificar estruturas menores), como indicado na Tabela 2.2.2-3:

Frequência central (MHz)	Resolução vertical (m)	
12,5	4	
25	2	
50	1	
100	0,50	
200	0,25	

Tabela 2.2.2-3: Frequência e Resolução vertical (Porsani, 1999).

A resolução horizontal é entendida como a área que o método GPR vai adquirir as informações do meio (área iluminada) para uma determinada profundidade de investigação (D), podendo-se estimar essa área iluminada pela Equação (2-18):

$$RH = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K-1}} \tag{2-18}$$

Sendo:

 $RH \rightarrow Raio$ do eixo maior da elipse da área iluminada.

 $\lambda \rightarrow$ Comprimento de onda da frequência central da antena.

Onde
$$\lambda = \frac{v}{f}$$
 sendo:

v a velocidade da onda eletromagnética no meio.

f a frequência central da antena.

 $D \rightarrow$ Profundidade de investigação.

 $K \rightarrow$ Permissibilidade dielétrica relativa média para a profundidade.

O tamanho da área está associado à largura da radiação da frente de onda da primeira zona de Fresnel (região onde a frente de onda incide), conforme a figura 2.2.2-3:



Figura 2.2.2-3: Largura da radiação da frente de onda da primeira zona de Fresnel (Reynolds, 1997).

O que observa-se na prática é que o tamanho da área iluminada aumenta com a profundidade, sendo então as informações fornecidas do meio pelo método GPR uma média da área iluminada para cada profundidade investigada, o que fica melhor entendido na figura 2.2.2-4 (Neal, 2004 e Reynolds, 1997):



Figura 2.2.2-4: Largura da radiação da frente de onda da primeira zona de Fresnel (Neal, 2004).

2.3 Técnica de Aquisição

O GPR usa ondas eletromagnéticas para obter informações da subsuperfície e detectar estruturas através das variações das propriedades elétricas do meio estudado. O equipamento de GPR é constituído de um módulo gerador de sinal (*Control Unit* - DAD) e de duas antenas, transmissora (T) e receptora (R). As informações recebidas pela antena R são transmitidas para o notebook, onde são armazenadas (*record*) e podem ser observadas em tempo real em sua tela (*Display*), o que permite a realização de processamentos simples durante a aquisição (figura 2.3-1). O módulo gerador de sinal do GPR, através da antena T, transmite para a subsuperfície pulsos eletromagnéticos de curta duração e alta frequência na faixa do MHz. Este sinal interage com o meio investigado, onde as mudanças das propriedades elétricas (condutividade elétrica e permissividade dielétrica) causam mudanças na velocidade da onda eletromagnética. Devido a tais mudanças de velocidade, parte do sinal que interage com o meio será refletido e parte continuará se deslocando pelo meio, até atingir outras mudanças de propriedades e refletir novamente parte do sinal ou até a energia do sinal transmitido acabar. Os sinais transmitidos de volta para a superfície pela reflexão serão recebidos pelo GPR através da antena R (Neal, 2004), (figura 2.3-1).



Figura 2.3-1: Esboço esquemático da aquisição de dados, mostrando componentes do sistema GPR e a configuração do refletor subsuperficial (Neal, 2004).

O tempo entre a transmissão, reflexão e recepção é referido como tempo duplo do sinal GPR e é medido em nanossegundos (10⁻⁹ s). Os sinais recebidos são exibidos como uma função do tempo duplo de viagem da onda e da distância percorrida pelas antenas ao ser deslocada em uma direção sobre a superfície (Neal, 2004). Para tanto, é associado um odômetro nas antenas. O sinal recebido contendo todas as informações de um ponto é denominado traço e a disposição dos traços de forma subsequente, associados a suas respectivas posições, produzem uma imagem de radar da subsuperfície denominada radargrama (figura 2.3-2 a).

No radargrama, o primeiro pulso a chegar é a onda aérea (*Air wave*), que viaja da antena T para a antena R à velocidade da luz c (0,2998 m/ns). O segundo pulso é a onda direta do solo (*Grounde wave*), que viaja diretamente pelo solo entre as antenas T e R (figura 2.3-2 b). As ondas aéreas e direta impedem a visualização de reflexões na parte superior de um perfil de radar (figura 2.3-2 a):



Figura 2.3-2: a – Radargrama resultante da plotagem sequencial de traços individuais de pontos de levantamento adjacentes. São indicados a onda aérea, a onda direta do solo e as reflexões primárias. b – Percursos da onda entre as antenas transmissora e receptora, para a onda de ar, a onda do solo, a onda lateral e a onda refletida, modificado de Neal, 2004.

A aquisição GPR efetuada neste trabalho utilizou duas técnicas distintas: perfil de reflexão com afastamento constante (*Common Offset*) e sondagem de velocidade por reflexão e refração de grande abertura angular (W*ide Angle Reflection and Refraction* - WARR), (figura 2.3-3:a e b):



Figura 2.3-3: a - Diagrama da aquisição Common Offset. b - Diagrama da aquisição WARR (Neal, 2004).

O perfil de reflexão com afastamento constante é o modelo de aquisição mais empregado para obtenção de um imageamento de subsuperfície resultando em um radargrama. Nessa técnica, as antenas T e R são mantidas sempre à mesma distância uma da outra e enquanto ambas são deslocadas na direção do perfil (figura 2.3-3 a). Nesse radargrama, o eixo vertical representa o tempo de ida e volta do sinal e no eixo horizontal são indicadas as posições das antenas ao longo do percurso.

Na técnica WARR, uma das antenas permanece fixa e a outra é afastada. Nessa técnica, o ideal é existir refletores planos e horizontais. O objetivo do WARR é determinar valores aproximados para velocidade da onda nos meios que esta atravessou e, assim, munido com as informações das velocidades das camadas que constituem um perfil, é possível converter o tempo de ida e volta do eixo vertical em profundidade (figura 2.3-3 b). Na figura 2.3-4 observamos uma sondagem de velocidade evidenciando a onda aérea, a onda superficial do solo e as ondas refletidas, mas além destas existem outras ondas que se deslocam pelo meio, como as ondas refratadas (*Refracted Wave*) e as ondas refratadas criticamente (*Critically Refracted Wave*). O percurso que essas ondas fazem da antena T até a antena R pode ser

observado na figura 2.3-5, assumindo que esse meio possua duas camadas e que a camada superior tenha permissividade dielétrica (ε) maior que a camada subsequente.



Figura 2.3-4: Radargrama de uma sondagem de veocidades feita com antenas de 100 MHz (Huisman, 2003).

Um radargrama esquematizado indicando todas as ondas na figura 2.3-6 nos explicita as características das ondas, em que a onda aérea pode ser entendida como uma equação linear representada por t = x/c, onde t é o tempo de ida e volta do sinal, x é o deslocamento da antena e c é a velocidade da luz. A onda direta do solo também pode ser compreendida pela equação t =x/v, onde v é a velocidade da onda no meio em que está se deslocando. As ondas refletidas podem ser entendidas como hipérboles definidas pela equação t = $((x^2+4d^2)^{0.5})/v$, onde d é a espessura da camada por onde a onda se propaga. A onda refratada criticamente pode ser definida pela equação t= x/c + const, onde const é uma constante (Annan, 2001).



Figura 2.3-5: Percursos de propagação das ondas eletromagnéticas em um solo com duas camadas de permissividade dielétrica contrastante, sendo $\varepsilon_1 > \varepsilon$ em uma sondagem de veocidades WARR, indicando as ondas aéreas, diretas do solo, refratadas, refletidas e refratadas criticamente (Huisman, 2003).



Figura 2.3-6: Diagrama esquemático de reflexões e refrações de uma sondagem de velocidades WARR. A onda no solo pode ser identificada como uma onda com um movimento linear a partir da origem do gráfico x - t. Nas equações de declive, c é a velocidade eletromagnética no ar e x é a separação da antena (Huisman, 2003).

2.4 Revisão de Estudos em Ambientes Fluviais e Aluvial Utilizando o Método GPR

Importantes estudos utilizando o método GPR em ambientes fluviais já foram realizados em sistemas ativos e depósitos antigos, contudo poucos estudos utilizando o método foram desenvolvidos na região do Pantanal, dos quais pode-se citar os estudos para os rios ativos na Bacia do Taquari de Souza et al. (2002) e de Porsani et al. (2005). A maior parte dos estudos com GPR em ambientes fluviais abordam rios ativos, tanto em rios de pequeno porte (Smith et al., 2006), quanto em rios de grande porte (Smith et al. 2009 e Lopes et al., 2013), mas são poucos os trabalhos feitos em ambientes paleofluviais (Vandenberghe e van Overmeeren., 1999) e menos ainda em ambientes de megaleques e leques aluviais (Franke et al., 2015).

Nos trabalhos de Souza et al. (2002) e de Porsani et al. (2005) a aquisição foi concentrada na calha sobre as águas do Rio Taquari. Ambas tiveram como objetivo subsidiar os estudos da Bacia do Taquari, visualizando a topografia do fundo do rio. Os dados de Souza et al. (2002) permitiram analisar a geometria da superfície de fundo, com informações a respeito dos tipos de sedimentos (arenosos, argilosos, entre outros). Em Porsani et al. (2005), os resultados mostraram que o leito do Rio Taquari é mais elevado em alguns metros do que da inundação adjacente. Constatou-se também a existência de um paleocanal pré-avulsivo e profundo na planície, sendo tomado por novos canais distributivos

Em Smith et al. (2006) é descrito o uso do GPR para retratar e quantificar os depósitos do Rio South Saskatchewan, no Canadá. Com os objetivos de retratar as principais características morfológicas, classificar as fácies sedimentares deposicionais dominantes e a arquitetura aluvial para uma variedade de tipos de barras com diferentes históricos deposicionais, o estudo investigou a ligação entre a arquitetura deposicional e a dinâmica de canal e barras. A identificação das radar fácies se deu através de características dos refletores, como ângulo de inclinação, relação, forma e continuidade.

No estudo de Lopes et al. (2013), foi utilizado o método GPR para imagear barras dos rios Tapajós e Amazonas, com a finalidade de reconstruir a forma destas e de inferir um padrão para evolução das barras fluviais da bacia. Isso foi realizado através de análise da disposição

dos refletores com base nos conceitos de radar fácies. As características observadas para a identificação dos padrões de radar fácies foram a forma, o mergulho, a amplitude, a relação entre os refletores e a continuidade.

Em Smith et al. (2009) são apresentados os principais aspectos deposicionais de grandes rios, aprofundando na compreensão do Rio Paraná, na Argentina, com o detalhamento dos depósitos sedimentares. Os autores compararam as informações e conclusões obtidas no Rio Paraná com outros rios, em busca de obter padrões de sedimentologia específicos para determinados ambientes. Concluíram a existência de padrões de estruturas arquiteturais diferentes para rios com regimes de descargas diferentes, através da análise das radar fácies obtidas. A determinação dos padrões de radar fácies desse estudo deu-se pelas características de mergulho, forma, relação entre os refletores, amplitude e continuidade.

Em Vandenberghe e van Overmeeren (1999), um estudo desenvolvido em ambientes paleofluviais no sul da Holanda, foram realizado levantamentos de GPR para caracterizar os padrões de reflexões. Foram apresentados três ambientes deposicionais distintos, os de rios meandrantes – rios Beugen e Lattum –, o de rio de transição – rio Haps – e os de rios entrelaçados – rios Tegelen e Mill. Assim, esses ambientes geraram padrões de radar fácies típicos para cada um deles, sendo caracterizados pela forma, continuidade, amplitude e pela forma externa das unidades de fácies.

Em Franke et al. (2015), o alvo do estudo é o leque aluvial de Illgraben, que está situado no vale do Ródano nos Alpes Suíços, no qual foram identificadas sete radar fácies e correlacionadas com afloramentos. Essas radar fácies foram definidas segundo sua forma, continuidade, amplitude e mergulho. Também foi confeccionado um modelo 3D para as estruturas deposicionais do leque aluvial, através de um mosaico de seções bidirecionais. Esse estudo afirmou que a combinação de análises sedimentológicas e pesquisas GPR permite decifrar a evolução temporal dos sistemas de leques aluviais, através da sua arquitetura e tendências deposicionais, o que possibilita associar mudanças de padrões de radar fácies com mudanças ambientais e/ou climáticas



Figura 2.4-1: Os sete padrões de radar fácies acima e uma seção GPR esquemática com as radar fácies (Franke et al. 2015).

2.5 Estratigrafia de Radar Fácies

Os princípios aplicados na interpretação estratigráfica de radar são originalmente atribuídos à metodologia da interpretação sísmica, sendo esta desenvolvida pela indústria do petróleo na década de 1970, através de uma interpretação de forma metódica das reflexões com o propósito de entender a estratigrafia e o ambiente deposicional. A criação dessa metodologia foi de fundamental relevância para a estratigrafia. Para o seu desenvolvimento, foram necessários muitos anos, sendo testada nos mais diversos ambientes (Jol e Bristow, 2003 e Neal, 2004).

Através dos radargramas, realiza-se uma interpretação estratigráfica e de fácies. Para tanto, as reflexões do radar devem ser identificadas e relacionadas às estruturas sedimentares responsáveis por elas. Sabendo que as reflexões do método GPR são análogas às reflexões sísmicas, adota-se que os ambientes deposicionais também podem ser interpretados a partir de registros de GPR. Assim, a estratigrafia de radar pode ser definida como o estudo de estratigrafia e fácies deposicionais interpretados a partir de dados de radar, com a utilização de princípios estratigráficos sísmicos (Jol e Bristow, 2003).

A habilidade de reconhecer os principais padrões de reflexão de radar permite que as superfícies de acamamento, os conjuntos de camadas e os conjuntos de estratificações cruzadas sejam visualizados (Jol e Bristow, 2003). Na interpretação de radargrama, outro conceito já consolidado atualmente é o de radar fácies, utilizado para discriminar ambientes sedimentares. Contudo, as mesmas radar fácies podem ser obtidas em uma grande diversidade de ambientes sedimentares, o que faz com que as radar fácies devam ser entendidas como não exclusivas de determinado ambiente (Jol e Bristow, 2003).

O processo de descrever e interpretar os parâmetros de reflexão do radar dentro de uma sequência deposicional é conhecido como análise de fácies de radar (estratigrafia de radar). Comparando a sísmica e o GPR, observamos uma maior resolução no GPR, sendo que a diferença de resolução entre as metodologias pode ser de uma até duas ordens de grandeza. Devido a esta alta resolução, o GPR possibilita uma investigação de unidades deposicionais menores, como a arquitetura interna de ambientes deltaicos, o preenchimento de canais fluviais

e dunas de areia. É relevante para o método de interpretação que essa peculiaridade de maior resolução seja levada em conta (Neal, 2004).

A consequência de podermos usar a mesma técnica de interpretação em investigações com duas escalas muito diferentes indica que sucessões sedimentares podem indicar uma hierarquia de unidades deposicionais, de lâminas individuais até bacias sedimentares inteiras. Apesar disso, e sabendo que um expressa o contraste de impedância dielétrica e o outro é devido a uma onda mecânica, os contrastes gerados por ambos que definem as unidades sedimentares e as unidades têm formas e estruturas internas semelhantes, o que permite utilizar metodologia de interpretação semelhantes que são: superfícies de radar, pacotes de radar e fácies de radar e são definidas da mesma forma que os termos empregados na estratigrafia sísmica, sendo estes elementos básicos da estratigrafia de radar (Neal, 2004), (figura:2.5-1).

A superfície de radar é entendida como superfície limitante de uma unidade estratigráfica composta por uma sucessão de estratos geneticamente relacionados, sendo caracterizada pelos tipos de terminações. Os pacotes de radar são formados de reflexões cujos parâmetros próprios diferem das fáceis adjacentes e possuem uma forma externa tridimensional (figura:2.5-1b). As fácies de radar são entendidas como conjuntos de reflexões concordantes entre si, separadas por superfícies limitantes, podendo ser padronizadas através de sua forma, mergulho, relação entre os próprios refletores e continuidade (Neal, 2004).

Embora grande parte da terminologia associada à estratigrafia sísmica possa ser aplicada diretamente à definição de uma estratigrafia de radar, recomenda-se que algumas das terminologias descritivas empregadas sejam modificadas. As configurações das reflexões de fácies de radar são descritas em termos de forma das reflexões, mergulho das reflexões, relação entre reflexões e continuidade das reflexões (Neal, 2004), (figura:2.5-1)



Figura 2.5-1: Terminologia para definir e descrever superfícies de radar, pacotes de radar e fácies de radar (Neal, 2004).

A definição da estratigrafia do radar permite a interpretação ambiental detalhada, particularmente quando combinada com a verificação do solo ou com outras formas de informações do ambiente. Já foi estabelecida a eficácia do método de mapear detalhes arquitetônicos em depósitos fluviais de profundidades de até 30 m, com resolução de até 10 cm, especialmente em depósitos saturados de grãos finos, como no caso das várzeas modernas, onde a penetração pode ser de apenas alguns metros (Miall, 1996).

A identificação das unidades deposicionais possui hierarquias que variam de primeira até sextas ordens: Primeira ordem são estratificações cruzadas com pouca ou nenhuma erosão interna. Representam a sedimentação de tipos similares de camadas semelhantes. Segunda ordem constituem um conjunto delimitado por mudanças no tipo de litofácies, que indicam

alterações nas condições e/ou na direção do fluxo. Normalmente, não são marcadas por truncamentos de camadas significativos ou outras evidências de erosão. Terceira e quarta ordens são definidas pelas superfícies superiores e internas das macroformas. As superfícies limitantes de terceira ordem são superfícies de erosão transversais que mergulham em um ângulo inferior, normalmente menor que 15°, e truncam superfícies de estratos subjacentes, incluindo superfícies de primeira e segunda ordens, em um ângulo inferior. Os conjuntos de fácies e geometrias acima e abaixo das superfícies de terceira ordem são semelhantes. Estas superfícies indicam mudanças no estágio ou na orientação da forma da camada. São comuns em macroformas e indicam uma forma de reativação em larga escala. As superfícies limitantes de quarta ordem são plano paralelas ou convexas para cima. A forma das superfícies de quarta ordem é comumente semelhante às superfícies internas de terceira ordem dentro do elemento subjacente. Camadas de lama em leitos abaixo da superfície são comuns. Conjuntos de fácies e geometrias de elementos e orientações acima e abaixo da superfície são diferentes. Superfícies de quarta ordem são interpretadas como superfícies limitantes superiores das macroformas e são paralelas às camadas subjacentes, podendo representar superfícies de crescimento. Superfícies de quinta ordem limitam grandes lençóis de areia, incluindo preenchimento de canais complexos. São lateralmente extensas, com dezenas a centenas de metros, geralmente planas e ligeiramente côncavas para cima, mas podem ser marcadas por um relevo local de corte e preenchimento. As superfícies de sexta ordem são entendidas como subdivisões estratigráficas mapeáveis de uma unidade fluvial, capazes de serem definidas como membros ou submembros. Elas podem cercar depósitos fluviais discretos em uma bacia sedimentar, grandes faixas de meandros e paleovales (Miall, 1988).



Figura 2.5-2: classificação da hierarquia de superfícies limitantes. O diagrama superior mostra um canal com vários grandes depósitos de macroformação. O diagrama central mostra a estratificação em uma macroforma, incluindo as superfícies de acreção, e o diagrama inferior mostra detalhes dentro dessa estratificação (Miall, 1988).

3. Aspectos Específicos

3.1 Localização

A Bacia do Alto Paraguai localiza-se na região Centro-Oeste do Brasil, estendendo-se pelos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. O Pantanal está inserido nesta bacia, como observado na figura 3.1-1. As seções dos perfis GPR deste estudo foram adquiridas no Megaleque do Rio Taquari, nos entornos do rio.



Figura 3.1-1: Imagem com a Bacia do Alto Paraguai em verde escuro, o Pantanal em verde médio e o Megaleque do Rio Taquari em verde claro (imagem modificada da internet: <u>http://www.riosvivos.org.br/arquivos/site_noticias_927317926.jpg</u>, acessado em fevereiro de 2018).

As aquisições foram realizadas no município de Coxim, localizado a 255 km de Campo Grande/MS. A área onde este estudo foi realizado está evidenciada na figura 3.1-2. Foram obtidos 49 perfis GPR com a técnica *Common offset*, totalizando mais de 21 km de perfis. Também foram realizadas 10 sondagens de velocidades CMP/WARR. Em cada local onde foi realizada a sondagem de velocidade, foi efetuado um furo de trado, o que permitiu estabelecer o nível d'água, sendo atribuído o nível d'água à seção GPR, através da informação do trado mais próximo. Dessas 49 seções, após passarem pelo processamento básico, foram selecionadas as que possuíam melhor resolução e que contemplavam razoavelmente toda a extensão da área estudada, restando nove seções, indicadas em três locais distintos na figura 3.1-3.



Figura 3.1-2: Imagem indicando o Megaleque do Rio Taquari em verde claro, o local onde foram realizadas as aquisições em laranja, o Rio Taquari em lilás e os municípios de Corumbá em vermelho e de Coxim em amarelo.



Figura 3.1-3: Imagem da região onde foram realizadas as aquisições (ampliação da região laranja da imagem 3.1-2), com destaque para as regiões onde foram realizadas as aquisições em branco, verde claro e amarelo. Indicação do local das seções GPR com setas laranjas, indicação do local das seções WARR e trado com estrelas vermelhas e indicação das estradas locais em amarelo.

As Figuras 3.1-4,3.1-5 e 3.1-6 mostram detalhes da região denominada "Branca" que se diferencia das outras por ser a mais proximal das três e pelo fato de suas aquisições estarem próximas do Rio Taquari, gerando os perfis A,B,G e H. O perfil G está localizado na parte ativa do Rio. A região "Azul" se caracteriza por estar localizada mais distal das três, contendo os perfis C e D localizados próximos ao rio. A região "Amarela" localiza-se entres as duas anteriores, e os seus perfis E, F e I estão afastados do rio, indicadas na figuras 3.1-3.



Figura 3.1-4: Imagem da região onde foram realizadas as aquisições (ampliação da região branca da imagem 3.1-3), indicação do local das seções GPR com setas laranjas, indicação do local das seções WARR e trado com estrelas vermelhas e estradas locais em amarelo.



Figura 3.1-5: Imagem da região onde foram realizadas as aquisições (ampliação da região azul da imagem 3.1-3), com indicação do local das seções GPR com setas laranjas, indicação do local das seções WARR e trado com estrelas vermelhas e estradas locais em amarelo.



Figura 3.1-6: Imagem da região onde foram realizadas as aquisições (ampliação da região amarela da imagem 3.1-3), com indicação do local das seções GPR com setas laranjas, indicação do local das seções WARR e trado com estrelas vermelhas e estradas locais em amarelo.

3.2. Aquisição

O equipamento utilizado neste estudo foi o GPR da IDS (*Ingegneria Dei Sistemi SPA*), composto de duas antenas, transmissora (T) e receptora (R), uma unidade de controle (*Control Unit-* DAD), um notebook e um odômetro acoplado às antenas (Figuras 3.2-1 e 3.2-2). As configurações do software que gerencia todos os parâmetros de aquisição de dados foi o K2 e foram utilizados os seguintes valores: 512 amostras por traços, tempo de registro de 256ns e distância entre cada traço ou ponto investigado da subsuperfície de 4 cm. Foram utilizadas antenas de frequência central de 100 MHz. Essa frequência de antenas foi escolhida porque elas permitem uma penetração relativa maior no ambiente geológico, mantendo uma resolução vertical de cerca de 25 cm. Com a configuração utilizada neste estudo, foi possível investigar profundidades de até 10m.



Figura 3.2-1 - Antenas transmissora e receptora da IDS de 100MHz, utilizadas neste estudo.

Neste estudo, as antenas possuem blindagem eletromagnética. Um notebook é usado para comandar a aquisição dos dados e observar os dados adquiridos em tempo real. Essa observação é muito importante no processo de aquisição, uma vez que permite controle de qualidade dos dados e aplicação de imediata correção, se for o caso de alguma irregularidade.



Figura 3.2-2: Imagens de aquisições realizadas em campo e indicações dos equipamentos que constituem o método GPR: Antenas, odômetro, unidade de controle (DAD) e notebook.

3.3. Processamento

O processamento dos dados foi aplicado a todas as 49 seções obtidas em campo. Posteriormente, foram escolhidas as nove seções que melhor representam as características observadas, as quais são apresentadas nesta pesquisa. Para o processamento, foi utilizado o software ReflexW versão 7.0 da Sandmeier.

Abaixo, segue a descrição das etapas do processamento:

- Remover ganho do cabeçário: antes de começar efetivamente o processamento dos dados, foi realizado um pré-processamento com o objetivo de remover qualquer curva de ganho que possa ter sido armazenada nos arquivos, deixando estes em estado bruto.
- 2- Correção do tempo zero: tem o objetivo de corrigir o desalinhamento da primeira chegada do sinal com o tempo zero. Esse desalinhamento é devido a um período inicial sem registro de informações.
- 3- Dewow: é um filtro 1D, que tem a característica de passar altas frequências, idealmente otimizado para permitir que o pico espectral de uma frequência central específica da antena passe com fidelidade, mas suprima a baixa frequência.
- 4- Ganho manual: tem como objetivo amplificar os refletores, o fato de ser manual possibilita a escolha de quais locais nas seções serão amplificados.
- 5- Background removal: esse filtro tem como objetivo retirar ruídos de fundo existentes nos dados de provável origem do ambiente. Para isto, é calculada uma média entre o conjunto de traços da seção, sendo obtido um valor de traço médio e este valor de traço médio é subtraído de cada traço da seção, então o filtro realiza a chamada remoção de plano de fundo.
- 6- Filtro passa banda: esse filtro tem a finalidade de restringir o intervalo de frequências observado, eliminando os valores mais baixos e mais altos. Para tanto, são atribuídas quatro frequências para configurar uma figura trapezoidal em torno da frequência central das antenas.

- 7- Running average: o objetivo desse filtro é suavizar os refletores eliminando ruídos, enfatizando a energia horizontalmente coerente, melhorando a visualização da continuidade dos refletores. Isto é feito através da atribuição de um novo valor para cada traço no intervalo da seção escolhido, esse novo valor é obtido através de uma média utilizando o valor do próprio traço e de traços à direita e à esquerda do traço analisado.
- 8- *Time-cut*: essa etapa tem o objetivo de limitar a seção em tempo no eixo vertical, sendo utilizada para eliminar trechos das seções onde o sinal não apresenta mais informações relevantes.

A segunda etapa de processamento foi realizada após a obtenção do modelo 2D de velocidade, obtido com as sete seções WARR realizadas próximas aos perfis já processados. Essas seções WARR também precisaram de um pequeno processamento, explicitado abaixo:

O processamento das seções WARR foram:

- 1- Correção do tempo
- 2- *Dewow*:

Com as seções WARR já processadas, foi realizada a análise das velocidades dos refletores. O produto dessa análise foi um modelo de velocidade bidimensional, que através da correção *normal move out* (NMO) caracterizou dois horizontes de velocidade: o primeiro mais superficial, de 0,1 m/ns, e o segundo logo abaixo do primeiro, de 0,095 m/ns.

A segunda fase do processamento contou com as seguintes etapas:

9- Filtro F-K: A finalidade desse filtro é a redução de ruídos verticais, funciona transformando o domínio do espaço em número de onda (x → k) e do domínio do tempo no domínio da frequência (t → F), através de uma transformação bidimensional de Fourier, produzindo um espectro onde é determinada a região com maior concentração das frequências significativas (filtro 2D)

- 10-Migração: A finalidade dessa etapa do processamento é aperfeiçoar a veracidade com que o perfil demonstra as estruturas geológicas, são reposicionados corretamente os eventos de reflexão da subsuperfície. Isso é feito através do colapso das difrações e, assim, revela um arranjo mais realista das reflexões subsuperficiais. Para este processamento, o modelo de velocidade 2D é utilizado.
- 11-Conversão tempo em profundidade: o objetivo dessa etapa do processamento é transformar o eixo de tempo em um eixo de profundidade com base no modelo de distribuição de velocidade 2D.

4. Resultados

4.1 Radar Fácies

A definição das radar fácies iniciou-se pela identificação de superfícies limitantes, que são refletores de maior continuidade e grandes contrastes nos radargramas, sendo os refletores superiores ou inferiores concordantes e/ou discordantes dessas superfícies limitantes. Foram identificadas de duas a três superfícies limitantes em cada seção GPR, apresentadas neste estudo. Em seguida, foram identificados os padrões de radar fácies existentes, através de critérios de forma, inclinação, relação entre refletores e continuidade, adaptado da metodologia de Neal (2004). Foram identificados, descritos e interpretados três padrões de radar fácies e para estes foram atribuídos um código inicializado pela letra R e um número de identificação, cada qual possuindo um nome: R1 - Refletores Horizontais a Sub-horizontais Paralelos; R2 - Refletores Inclinados; R3 - Refletores Levemente Inclinados e Ondulados. A radar fácie R2 apresentou duas subdivisões dentro do mesmo padrão, já que ambas apresentaram bastante similaridade para serem consideradas duas radar fácies distintas. Tal subdivisão foi aplicada ao código atribuindo uma letra após o seu número de identificação e cada uma também possui seu nome: R2a - Refletores Menos Inclinados Subparalelos e R2b - Refletores Inclinados Paralelos.

	Descrição	Interpretação	Radar Fáceis
<mark>R1</mark>	Refletores horizontais à sub- horizontais, contínuos a moderadamente contínuos. Paralelos, com espessura entre os refletores de 0,40 m.	Refletores horizontais representam conjunto de limites de série em pequena escala. Devido à resolução do GPR, não é possível identificar estruturas sedimentares entre os refletores, ripples com resolução abaixo do GPR.	
R2a	Refletores levemente inclinados, moderadamente descontínuos. Subparalelas com espessura entre os refletores de 0,30 m. Possuem formas côncavos para cima com comprimento de onda 2,0 m e alta amplitude.	Refletores inclinados em menor ângulo relacionados a estratificação cruzada de baixo ângulo.	0.002461020304050
R2b	Refletores pouco inclinados contínuos, paralelos, com espessura entre os refletores de 0,30 m e espessura dos conjuntos de refletores de 1,0 m.	Refletores inclinados formados por estratificação cruzada	
<mark>R3</mark>	Refletores levemente inclinados e ondulados, moderadamente contínuos à descontínuos, subparalelas com espessura entre os refletores de 0,30 m. Com forma côncavos para cima, com largura de 2,0 m e com alta amplitude	Refletores formados por estratificação cruzada acanalada de dunas de médio a pequeno porte.	

Tabela 4.1-1: Padrões de radar fácies, organizados em código, descrição, interpretação e imagem de cada tipo de radar.

R1 - Refletores Horizontais a Sub-horizontais Paralelos – pode ser descrito como um conjunto de refletores com formas planares (lineares em seção), com mergulho de horizontais a sub-horizontais, contínuos à moderadamente contínuos. A relação entre os seus refletores é paralela, possuindo distância aproximada de 0,40 m entre eles. Esses conjuntos de refletores são identificados em todas as seções, sua espessura 1,5 m até 4,5 m, contínuos lateralmente durante praticamente toda a seção. Sua ocorrência varia de 0 até 5,5 m de profundidade, sendo identificada predominantemente nas regiões mais rasas dos registos GPR.

R1 pode ser interpretado como limites contínuos de séries de laminação cruzada, que por suas dimensões não permitem a observação de estratos cruzados dentro da resolução, e níveis contínuos de depósitos de decantação. Provavelmente tratam-se de depósitos de planície de inundação, formados com o transbordamento das águas, carregadas de sedimentos, dos diques marginais para as margens, transformando as margens inundadas em uma espécie de bacia de decantação para os sedimentos que ultrapassaram o limite dos diques (Miall, 1996, Bridge, 2003). Nesse contexto predomina acréscimo vertical.

R2a - Refletores Inclinados Subparalelos – pode ser descrito como um conjunto de refletores com formas côncavas para cima com comprimento de onda 2,0 m e alta amplitude, com inclinação maior que a dos refletores inclinados da radar fácies R2b, sendo seus refletores moderadamente contínuos a descontínuos. A relação entre os seus refletores é subparalela, possuindo distância entre os refletores de aproximadamente 0,30 m. Esses conjuntos de refletores são identificados em apenas uma seção, tendo a espessura dos conjuntos de refletores identificada no radargrama de 3,0 m até 5,5 m, contínuos lateralmente durante praticamente toda a seção. Sua ocorrência varia de 1,5 até 7,5 m de profundidade, sendo identificada exclusivamente na região central, a mais profunda do registo GPR.

R2b - **Refletores Inclinados Paralelos** – pode ser descrito como um conjunto de refletores inclinados, sendo seus refletores moderadamente contínuos, a relação entre os seus refletores é paralela, possuindo espessura aproximada de 0,30 m entre os refletores. Esses conjuntos de refletores são identificados em apenas uma seção, tendo a espessura dos conjuntos de refletores de 1,0 m, com continuidade lateral localizada variando de 5,5m a 10 m. Sua ocorrência varia de 3,0 até 5,0 m de profundidade, sendo identificada na região central do registo GPR.
Com base na inclinação sistemática dos refletores na mesma direção, as radar fácies R2 podem ser interpretadas como depósitos de barra de acréscimo lateral, sendo originadas com a deposição de sedimentos na curvatura do rio e o acúmulo dos sedimentos trazidos pelo fluxo do rio nas margens convexas. Nesse contexto, cada refletor constituiria um limite de séries de laminações ou estratificações cruzadas, sendo essas estruturas internas menores que a resolução, e sua inclinação caracteriza acréscimo lateral. A espessura dos conjuntos, de poucos metros, é compatível com a profundidade dos canais hoje ativos na região. Diferenças na inclinação dos refletores de R2a e R2b podem ser atribuídas a diferenças na orientação da seção com relação ao plano inclinado de estratificação.

R3 - **Refletores Levemente Inclinados e Ondulados** – pode ser descrito como um conjunto de refletores levemente inclinados e ondulados, sendo seus refletores moderadamente contínuos a descontínuos, a relação entre os seus refletores é subparalela, possuindo espessura aproximada de 0,30 m entre os refletores, com forma côncavas para cima com comprimento de onda de 2,0 m e alta amplitude. Esses conjuntos de refletores são identificados em quase todas as seções, tendo a espessura dos conjuntos de refletores de 1,5 m até 7,0 m, contínuos lateralmente durante praticamente toda a seção, sua ocorrência varia de 1,0 m até 10,0 m de profundidade, sendo identificada na região central, a mais profunda do registo GPR. Podendo ser interpretadas como estratificação cruzada acanalada de dunas de médio a pequeno porte.

A ampla ocorrência de refletores descontínuos côncavos sugere a abundância de estratos cruzados acanalados nesta radar fácies implicando em um sistema fluvial de porte consideravelmente maior que o atual ou o registrado pelas radar fácies R1 e R2, dada a maior dimensão dos estratos cruzados (e.g. Paola & Borgman, 1991; Leclair & Bridge, 2001).

4.2. Descrição e Interpretação das Seções

As interpretações das seções estão apresentadas de acordo com as regiões em que os dados foram obtidos, com o intuito de facilitar a identificação de possíveis variações causadas pela localização da aquisição. Foram definidas três regiões: Leste (branca), Noroeste (azul) e Sul (amarela), representadas na figura 3.1-3.

A primeira a ser abordada é a região Leste, região mais proximal no megaleque em relação às três regiões que compõem este estudo, com declividade de 0,2 m / km para NW e feições de canais reliquiares que forma padrão radial para aquele quadrante (figura 3.1-3). As seções que estão inseridas nesta região são A, B, H e G.

A linha A está localizada no ambiente não ativo do rio, no extremo Norte da região Leste (figura 3.1-4). Possui mais de 1 km de comprimento e 7 m de profundidade e o nível d'água está 0,7 m da superfície, com orientação N65, transversal ao declive local do terreno para NW. Mesmo com sua grande extensão, existe uma continuidade lateral da radar fácies R1 na parte mais rasa e da radar fácies R2a em maior profundidade, ao longo de toda a seção, como pode ser visto em trechos destacados do início (trechos de 80 m até 280 m de distância), do meio (440 m até 590 m e de 750 m à 850 m de distância) e do final (1100 m à 1200 m de distância) da seção. A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 2,5 m. Dentro do pacote de refletores planos existem mudanças de amplitude, sendo que a parte mais rasa, acima de 2,0 m, possui refletores mais contínuos e com maior espaçamento entre os refletores, e a parte abaixo, de 2,0 m à 2,5 m, refletores mais descontínuos e com menor resolução, podendo representar diferentes fases de evolução do rio. Abaixo de 2,5 m de profundidade predominam a radar fácies R2a (cor rosa), na qual refletores inclinados e contínuos sugerem a migração de barras com tamanho proporcional às barras atuais, mostrando outra fase e/ou outro ambiente. A superfície que separa os dois conjuntos pode ser considerada como de 4a ordem pelos critérios de Miall (1988).



Figura 4.2-1:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção A, com detalhes de quatro trechos e suas respectivas radar fácies.

A linha B está também localizada no ambiente não ativo do rio, a Sudeste e a montante da linha A e dista desta em mais de 10,0 km (figura 3.1-4). Possui aproximadamente 336 m de comprimento e 6,3 m de profundidade e o nível d'água é de 0,8 m da superfície e orientação N40, transversal ao declive local do terreno para NW. Apresenta continuidade lateral da radar fácies R1 na parte mais rasa e na parte intermediária, sendo estas separadas por uma área de radar fácies R3, que se repete em maior profundidade, e todas contendo continuidade lateral ao longo de toda a seção, o que se pode observar nos trechos destacados do início (trechos de 30 m até 107 m de distância) e da porção central (trechos de 220 m até 240 m de distância), e porção final (290 m até 330 m de distância).

A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 0,8 m e têm sua base coincidente com o nível d'água. Dentro desse pacote de refletores planos não existem mudanças significativas. A mesma radar fácies R1 (cor amarela) são observadas na profundidade de 3,0 m à 5,0 m, apresentando variação lateral na resolução e pacote de refletores mais planos. Se comparado com a parte mais rasa de refletores caracterizados pela mesma radar fácies, o pacote de refletores mais raso possuem maior espaçamento entre os refletores do que o mais profundo, podendo representar diferentes períodos do rio, separados por uma mudança de ambiente deposicional. Nas porções intermediária e mais profunda da seção podemos identificar a radar fácies R3 (cor verde), compostas por estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 0,8 m à 3,0 m e 5,0 m à 6,3m. O pacote de refletores mais raso caracterizado pela radar fácies R3 (verde) se diferencia da porção mais profunda de mesma radar fácies, pela sua menor dimensão dos estratos cruzados e também porque a mais rasa possui maior resolução e maior espaçamento entre os refletores. As características apresentadas dos pacotes de refletores R3 sugerem um sistema fluvial de porte maior, registrado pela radar fácies R1. A superfície que separa os dois conjuntos pode ser considerada como de 4ª ordem pelos critérios de Miall (1988). Essas características podem representar variações cíclicas no rio devido a alterações do ambiente deposicionais e, possivelmente, a um sistema desenvolvido sob um regime climático diverso em períodos distintos.



Figura 4.2-2:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção B, com detalhes de três trechos e suas respectivas radar fácies.

A linha G está localizada no ambiente ativo do rio, a Sudoeste e a jusante da linha B e dista desta em quase 5,0 km (figura 3.1-4). Possui aproximadamente 270 m de comprimento e 8,5 m de profundidade e o nível d'água é de 0,8 m, com orientação N148, aproximadamente aralela ao declive local para NW. Apresenta continuidade lateral da radar fácies R1 na parte mais rasa e a radar fácies R3 com continuidade lateral na porção intermediária à mais profunda. Isto ocorre ao longo de toda a seção, o que observa-se nos trechos destacados da porção inicial deslocada ao centro (trechos de 50 m até 100 m de distância) e da porção final deslocada ao centro (140 m até 200 m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 2,0 m. Dentro deste pacote de refletores planos observamos na sua parte superior até 0,8m, coincidindo com o nível d'água, uma menor resolução e maior espaçamento entre os refletores em comparação com a porção mais profunda desse pacote de refletores de 0,8 m até 2,0 m, o que pode representar os depósitos atuais do rio. Na porção intermediária à mais profunda da seção podemos identificar radar fácies R3 (cor verde), que são estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 2,0 m à 8,5 m. Dentro deste pacote de estratificações cruzadas acanaladas nota-se na sua parte superior até 5,5 m maior continuidade e menor espaçamento entre os refletores em comparação com a porção mais profunda desse pacote de refletores de 5,5 m até 8,5 m. As características apresentadas do pacote de refletores R3 sugerem um sistema de transição na sua porção superior para um regime deposicional diferente na porção inferior. Estas características mostradas deste perfil podem ser a representação dos depósitos atuais passando por uma zona de transição até outro regime deposicional.



Figura 4.2-3:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção G, com detalhes de dois trechos e suas respectivas radar fácies.

A linha H está localizada no ambiente não ativo do rio, a Sudoeste e a montante da linha G e dista desta aproximadamente 2,0 km (figura 3.1-4). Possui aproximadamente 295 m de comprimento e 10,0 m de profundidade e o nível d'água é de 0,8 m, com orientação N16, aproximadamente perpendicular ao declive local para NW. Esta seção contém fácies R1 na parte mais rasa a intermediária, com continuidade lateral e a radar fácies R3 na porção intermediária à mais profunda da seção, com continuidade lateral. Isto ocorre ao longo de toda a seção, o que observa-se no trecho em destaque localizado na parte intermediária até o final da seção (130 m até 290 m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 5,5 m. Dentro deste pacote de refletores planos observamos na sua parte superior até 2,5m uma porção de maior espaçamento entre os refletores até o nível d'água, em seguida este espacamento entre os refletores diminui progressivamente com a profundidade de até 2,5 m, que passa a apresentar logo abaixo deste pacote um maior espaçamento entre os refletores até 5,5 m. Este contraste no espaçamento entre os refletores planares pode representar uma mudança no regime deposicional. Na porção intermediária à mais profunda da seção podemos identificar radar fácies R3 (cor verde), que são estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 5,5 m a 10,0 m. Dentro deste pacote há estratificações cruzadas acanaladas com menor amplitude e descontinuidade, mas com eventuais refletores com uma certa continuidade lateral até a profundidade de 10,0 m. Estes atributos indicam que este perfil pode representar outro regime deposicional de maior energia em maior profundidade.



Figura 4.2-4:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção H, com detalhe de um trecho e suas respectivas radar fácies.

A segunda região é a Noroeste, caracterizada por ser a região mais distal no megaleque em relação às três regiões que compõem este estudo. A área tem declividade de 5 m /km para WNW, e comporta canais reliquiares sinuosos de diferentes comprimentos de onda, aparentemente em distribuição radial (figura 3.1-3). As seções que estão inseridas nesta região são C e D.

A linha C está localizada no ambiente não ativo do rio, a Sudoeste na região azul (figura 3.1-5). Possui extensão de 409 m e 10,0 m de profundidade e o nível d'água é de 3,4 m, com orientação N110 aproximadamente paralela à declividade local (ainda que os paleocanais mostrem-se muito sinuosos). Esta seção contém radar fácies R1 na parte mais rasa a intermediária, com continuidade lateral e a radar fácies R3 na porção intermediária a mais profunda da seção, com continuidade lateral. Isto ocorre ao longo de toda a seção, como observa-se no trecho em destaque localizado na parte central da seção (150 m até 360 m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 3,4 m. Dentro deste pacote de refletores planos observados na sua parte superior até 2,0 m, observam-se refletores de menor espaçamento e maior continuidade com relação à segunda parte deste pacote que termina no nível d'água. Esta variação pode indicar processos deposicionais em diferentes estágios de evolução do rio. Na porção intermediária a mais profunda da seção podemos identificar radar fácies R3 (cor verde), que são estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 3,4 m à 10,0 m. Dentro deste pacote de estratificações cruzadas acanaladas nota-se, na sua parte superior até 9,0 m, uma maior descontinuidade, maior espaçamento entre os refletores e maior resolução em comparação com a porção mais profunda desse pacote de refletores. Observa-se também um extenso refletor horizontal que divide as duas porções desse pacote de refletores. As características apresentadas no pacote de refletores R3 podem decorrer de limitações da profundidade de penetração do sinal GPR. O conjunto de características dessa seção pode indicar um sistema fluvial de porte maior registrado no conjunto mais profundo e mais antigo.



Figura 4.2-5:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção C, com detalhe de um trecho e suas respectivas radar fácies.

A linha D está localizada no ambiente não ativo do rio, a Noroeste e a jusante da linha C e dista desta aproximadamente 10,0 km (figura 3.1-5). Possui extensão de 353 m de comprimento e 8,6 m de profundidade e o nível d'água é de 2,0 m, com orientação N-S transversal ao declive local. Esta seção apresenta predomínio da radar fácies R1 na parte mais rasa, sendo que estes refletores tornam-se mais profundos a partir da metade da seção até seu fim. Estes conjuntos de refletores contêm continuidade lateral ao longo de toda a seção. A radar fácies R3 está localizada na porção intermediária a mais profunda da seção, com grande continuidade lateral, como pode ser observado nos trechos em destaque localizados na parte inicial da seção (75 m até 120 m de distância), na parte intermediária da seção (170 m até 220 m de distância) e na parte final da seção (330 m até 350 m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 2,0 m na porção inicial e no restante da seção atingem até 4,0 m. Dentro deste pacote de refletores planos observados há um conjunto de refletores de maior amplitude com relação à segunda parte, sendo que a porção superior do conjunto termina no nível d'água. Esta variação pode indicar variação do processos deposicionais ao longo do tempo. Na porção intermediária até a mais profunda da seção podemos identificar a radar fácies R3 (cor verde), interpretada como estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 4,0 m à 8,6 m. Dentro deste pacote de estratificações cruzadas acanaladas nota-se que o espaçamento entre os refletores aumenta com a profundidade. Também destaca-se na porção intermediária à final da seção, na profundidade de 2,0 m até o fim da seção, um caráter mais plano dos refletores, imediatamente abaixo do nível d'água, sendo plausível supor que essa característica decorra de alguma interferência ambiental no sinal de GPR. Estes atributos sugerem uma mudança temporal de um regime deposicional de maior energia em maior profundidade para sistemas mais semelhantes ao atual.



Figura 4.2-6:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção D, com detalhes de três trechos e suas respectivas radar fácies.

A terceira área abordada é a região Sul, uma região entre as duas anteriores e com as seções localizadas em ambiente afastado do rio e não ativo. A área tem declividade de 5 m /km radial para todo o hemisfério Oeste, e comporta canais reliquiares sinuosos com distribuição radial divergente cerca de 75° (figura 3.1-3) As seções que estão inseridas nesta região são E, F e I.

A linha E localiza-se a Nordeste na região Sul (figura 3.1-6). Possui extensão de 1235 m de comprimento e 8,6 m profundidade e o nível d'água é de 2,0 m, com orientação N-S transversal aos canais reliquiares que aparecem em superfície. Esta seção contém fácies R1 na parte mais rasa a intermediária e a radar fácies R3 na porção intermediária a mais profunda com grande continuidade lateral como observado no trecho em destaque localizado na parte inicial (380 m até 500 m de distância), na parte central (760 m até 840 m de distância) e na parte final (970 m até 1.300m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 3,4 m. Dentro deste pacote de refletores planos observados na sua parte superior até 2,0 m, observam-se refletores de maior continuidade com relação à parte inferior deste pacote, que termina a 5,0 m. Esta variação pode indicar processos deposicionais em diferentes estágios de evolução do rio. Na porção intermediária a mais profunda da seção, podemos identificar radar fácies R3 (cor verde), interpretada como cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 5,0 m à 8,6 m. Dentro deste pacote de estratificações cruzadas acanaladas nota-se a diminuição da resolução com a profundidade e a presença de refletores com maior continuidade de forma isolada. O conjunto de características desta seção pode indicar um sistema fluvial de porte menor depositado sobre um sistema de maior vazão mais antigo. A superfície que separa os dois conjuntos pode ser considerada como de 4ª ordem pelos critérios de Miall (1988).





Figura 4.2-7:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção E, com detalhes de três trechos e suas respectivas radar fácies.

A linha F localiza-se a Sul da linha E e dista desta aproximadamente 4,0 km (figura 3.1-6). Possui extensão de 240 m de comprimento e 6,3 m de profundidade e o nível d'água é de 1,8 m, com orientação N98 oblíqua a cerca de 30° da orientação dos canais reliquiares observáveis em superfície. Esta seção contém radar fácies R1 na parte mais rasa e radar fácies R3 na porção intermediária a mais profunda da seção, além da radar fácies R2b na porção intermediária de forma isolada, o que é observado no trecho em destaque localizado na parte inicial (0 m até 15 m de distância) e na parte central à final (80 m até 240 m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 1,6 m. Dentro deste pacote de refletores planos, localizados na sua parte superior até 0,5 m, observam-se refletores de maior espaçamento entre si e maior continuidade com relação à parte inferior, desse pacote de refletores até 1,6 m. Na porção intermediária a mais profunda da seção, podemos identificar radar fácies R3 (cor verde), interpretada como estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 1,6 m a 6,3 m. Dentro deste pacote de estratificações cruzadas acanaladas observa-se, na sua parte superior de 1,6 m até 4,7 m, uma maior continuidade, maior amplitude pontual em refletores mais rasos desse pacote até 4,0 m de profundidade e maior resolução em comparação com a porção mais profunda desse pacote de refletores. Adicionalmente, observa-se a presença da radar fácies R2b (cor rosa), como um conjunto de refletores inclinados isolados, localizados, no início da seção, às profundidades de 3,0 m a 4,5 m e com extensão de aproximadamente 10,0 m e no, meio da seção, às profundidade de 3,5 m a 5,0 m, com extensão de aproximadamente 7,0 m. Também é observado um refletor com extensão lateral de muitas centenas de metros e com alta amplitude, que pode ser entendido como limitante de elemento arquitetural, classificado como de 5^a ordem pelos critérios de Miall (1988). As características apresentadas no pacote de refletores R2b podem ser entendidas como depósitos de barra. O elemento arquitetural identificado pode ser compreendido como um paleocanal seccionado de forma transversal a seu eixo.



Figura 4.2-8:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção F, com detalhes de dois trechos e suas respectivas radar fácies.

A linha I localiza-se a Sudoeste da linha F e dista desta aproximadamente 7,5 km (figura 3.1-4). Possui aproximadamente 565 m de comprimento e 8,8m de profundidade e o nível d'água é de 2,4 m, com orientação N90 oblígua a cerca de 45° dos paleocanais observáveis em superfície. Esta seção contém radar fácies R1 na parte mais rasa e radar fácies R3 na porção intermediária a mais profunda da seção. O domínio dessas duas radar fácies ocorre ao longo de toda a seção, como observa-se no trecho em destaque localizado na parte inicial (70 m até 220 m de distância), na parte inicial a intermediária (255 m até 288 m de distância), na parte intermediária à final (300 m até 350 m de distância) e na parte final (470 m até 520 m de distância). A radar fácies R1 (cor amarela) são limites de séries de pequeno porte que chegam à profundidade de até 2,4 m. Dentro deste pacote de refletores planos observamos, na sua parte superior até 1,2 m, maior continuidade, maior amplitude e maior espaçamento entre os refletores sendo que a base do conjunto inferior que se estende de 1,2m até 2,4m coincide com o nível d'água. Na porção intermediária a mais profunda da seção podemos identificar radar fácies R3 (cor verde), resultante de cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte, localizadas nas profundidades de 2,4 m a 8,8 m. Dentro deste pacote de estratificações cruzadas acanaladas observamos, na parte superior localizada até 5,0 m, menor espacamento entre os refletores e maior continuidade comparadas com as da parte inferior.

Em todas as seções estudadas observa-se uma marcante mudança de radar fácies entre os níveis mais profundos e os mais rasos, com amplo predomínio da radar fácies R3 a maiores profundidade e R1 em níveis mais profundos, isso implica em uma provável mudança de ambiente deposicional ocorrido devido a mudanças climáticas pretéritas.



Figura 4.2-9:a) Detalhe da localização da seção. b) Imagem da seção F, com detalhes de quatro trechos e suas respectivas radar fácies.

5. Discussão

5.1 Comparação com Estudos Realizados no Rio Taquari e em Outros Rios

Neste tópico, os resultados apresentados são comparados com outros trabalhos realizados no Rio Taquari (Souza et al., 2002 e de Porsani et al., 2005), em rios ativos de pequeno porte (Smith et al.,2006), rios de grande porte (Lopes et al.,2013 e Smith et al.,2009), ambientes de paleorio (Vandenberghe e van Overmeeren , 1999) e ambiente de leque aluvial (Franke et al., 2015).

As pesquisas de Souza et al. (2002) e de Porsani et al. (2005), mesmo tendo sido realizadas no Rio Taquari, diferenciam-se deste trabalho em alguns aspectos, pois foram realizadas sobre as águas do Rio Taquari em sua calha e não utilizaram a mesma técnica de interpretação por radar fácies. Porém, observa-se que os resultados apresentados por estes autores são de uma penetração de investigação da subsuperfície com variação similar a este estudo, sendo observada com clareza a batimetria do fundo do rio. Apesar do presente estudo ser realizado em ambiente distinto, em paleorios próximos ao rio Taquari, ambos os estudos imagearam a topografia do rio, sendo que em Porsani et al. (2005) ocorreu a identificação de estruturas como ripples no leito do rio do canal principal e de um canal abandonado. Comparando as estruturas de canais principais e abandonados identificadas no estudo de Porsani et al. (2005) com a presente dissertação, observa-se que existem estruturas similares, identificadas na seção F (figura 4.2-8, refletores destacados em azul), que são interpretadas como um paleocanal e este, por sua vez, possui uma proporção ligeiramente maior do que aquelas estruturas. Assim, os trabalhos pioneiros destes autores já mostravam a viabilidade de estudos de GPR na região pantaneira.

Em comparação com rios de pequeno porte, podemos verificar no estudo de Smith et al. (2006), realizado no Rio South Saskatchewan, no Canadá, onde foram identificadas quatro radar fácies, que três delas são semelhantes às identificadas nesta dissertação, interpretadas como refletores de alto ângulo de inclinação e com padrões semelhantes com a radar fácies R2

das seção seções A e F, interpretadas como depósitos de barras (figura 4.2-1 e figura 4.2-8). As seções identificadas como oblíquas descontínuas se assemelham com a radar facies R3 identificadas em todos as seções, com exceção da seção A, interpretadas como estratificação cruzada acanalada de dunas de médio a pequeno porte. As seções identificadas como refletores de baixo ângulo assemelham-se com a radar fácies R1 identificadas em todas as seções e interpretadas como conjuntos de limites de séries em pequena escala, sendo semelhantes também na distribuição em profundidade que as radar fáceis estão localizadas.

Em comparação com rios de grande porte, podemos verificar no estudo de Lopes et al. (2013), realizados nos rios Tapajós e Amazonas, onde foram identificadas seis radar fácies, que somente duas delas possuem alguma semelhança com as desta dissertação, mas a sua distribuição em profundidade praticamente não possui semelhança com as seções deste trabalho, sendo possível que esta diferença seja devido à diferença de porte dos rios ou do ambiente deposicional onde foram obtidas as seções. Já no estudo de Smith et al. (2009), realizado no Rio Paraná, Argentina, constatou-se que os padrões de radar fácies foram apresentados em três tipos, sendo os dois primeiros subdivididos em cinco padrões devido as suas escalas e, em comparação com os padrões de radar fácies identificados nesta dissertação, assemelham-se em apenas um, aquele em que os refletores caracterizados por estratos cruzados de dunas de grande escala assemelham-se com a radar fácies R3, identificadas como estratificação cruzada acanalada de dunas de médio a pequeno porte. Aqui também nota-se diferença no porte das estruturas, se comparado com as observadas no Megaleque do Rio Taquari.

Na comparação com um trabalho em ambientes de paleorio, verificamos no estudo de Vandenberghe e van Overmeeren et al. (1999) a identificação de cinco radar fácies. Destas, quatro possuem semelhanças com as do presente estudo. A radar fácies do Rio Lottun, interpretadas como ambiente meandrante, possuem grande semelhança com a seção A. A radar fácies do Rio Beugen, caracterizadas como ambiente meandrante de canal, possuem semelhança com a seção F. E todas as outras seções desta presente dissertação possuem certa semelhança com a radar fácies de transição do Rio Haps e com as de ambiente entrelaçado de canal do Rio Tegele. No estudo em ambiente de leque aluvial de Franke et al. (2015), localizado em Ródano, Alpes Suíços, foram observadas sete radar fácies, das quais duas possuem muita semelhança com as radar fácies desta dissertação: a Rf1 com a R1, a Rf3 com a R2 (figuras 2.4-1 e tabela 4.1-1). As radar fácies Rf2 e Rf4 possuem certa semelhança com a R3, porém a distribuição em profundidade destas três radar fácies não se assemelha com as deste trabalho, o que talvez possa ser explicado devido à energia no transporte dos sedimentos, já que o estudo citado está localizado mais próximo do seu aporte de sedimentos do que na presente pesquisa.

Por fim, na comparação dos resultados apresentados com os resultados dos estudos analisados, percebemos que a maior compatibilidade se dá com os trabalhos realizados também no Rio Taquari, mesmo que eles tenham grandes diferenças de ambientes de investigação e interpretação. Há também uma certa semelhança na comparação com os resultados de estudos em paleorio e em leque aluvial relação a forma de estruturas sedimentares, dimensões de formas se diferenciado no caso de leque aluvial na distribuição das radar fácies em profundidades , uma menor compatibilidade nos resultados dos estudos de rios de pequeno porte e grande porte, sendo a menor similaridade com os estudos em rios de grande porte em relação a forma de estruturas sedimentares, mas diferenciam em dimensões de formas e profundidades.

5.2 Possíveis Mudanças Climáticas Responsáveis Pelas Alterações do Ambiente Deposicional

As variações de radar fácies identificadas no capítulo "Resultados" foram interpretadas como alterações de ambiente deposicional. Uma das prováveis causas destas alterações pode ser as mudanças climáticas ocorridas no passado. Tais mudanças já foram abordadas em outros trabalhos, como em Assine (2003), que através de testemunhos localizados próximos aos dados colhidos no presente estudo, indicados na figura 5.2-1, observou testemunhos de sondagem com variação de profundidade de 0,95 m até 2,25 m e, com datação pelo método de TL (termoluminescência), obteve datações com variação de 10800 a 40300 anos. Comparando com os dados da presente pesquisa, localizados em uma profundidade que varia de 6,0 m a 10, 0 m, pode-se supor uma idade ainda mais antiga para camadas mais profundas do ambiente deposicional investigado.



Figura 5.2-1: Áreas onde foram obtidos os testemunhos de sondagem em preto e local dos dados deste trabalho em vermelho (modificado de Assine, 2003).

Para essa possível idade, superior a 40 mil anos, temos que regredir ao Pleistoceno, quando teria ocorrido a formação dos leques do Pantanal. Assine (2003) interpreta clima quente semi-úmido na região central do Brasil, em período anterior a 32400 anos. O autor interpreta que, no último período de glaciação (aproximadamente 18 a 22 mil anos antes do presente), a formação dos megaleques ocorreu sob clima semiárido e que o padrão de paleocanais em superfície indica ambiente úmido em um intervalo de tempo posterior, ainda no Pleistoceno. No máximo glacial, devido à diminuição dos índices fluviométricos neste intervalo tempo, ocorreu erosão eólica maior (Assine, 2003). E no período posterior à glaciação ocorreu uma grande variação do clima durante determinados períodos de tempo. Devido à maior temperatura e umidade do Holoceno, o ambiente se modificou, adaptando-se com o aparecimento de pantanais (*wetlands*), como os de hoje.

Outro estudo que trata das variações climáticas no intervalo de tempo aqui estudado é o de Wang et al. (2017), que utilizaram datações U-Th e dados de isótopos de oxigênio em espeleotemas em registro dos últimos 45.000 anos. Tais dados foram obtidos de estruturas de caverna localizadas na Amazônia, mais especificamente da Caverna do Paraíso. O registro mostra variação de precipitação nos últimos 45 000 anos, inversamente proporcional o Delta 18°, revelando períodos mais e menos úmidos com periodicidade de cerca de mil anos. Assim, o intervalo anterior a 40 mil anos que registra possível sistema fluvial de maior vazão que o atual nas seções de GPR do rio Taquari, poderia relacionar-se a um dos vários eventos de aumento da precipitação em escala regional reconhecidos por Wang et al. (2017), e não necessariamente a um período prolongado de alta precipitação (figura 5.2-2).



Figura 5.2-2: Gráfico das concentrações de isótopos por milhares de anos, modificado de (Wang et al. ,2017).

Mesmos este estudo tendo sido realizado com informações da Amazônia, suas constatações podem ser expandidas, já que os efeitos climáticos regionais no flanco leste andino relacionam-se ao transporte de umidade amazônica que passa pela área de estudo e controla o registro até no sudeste brasileiro (figura 5.2-3) (Bernal et al., 2016).



Figura 5.2-3:imagem com destaque para Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), Zona de Convergência da América do Sul (SACZ), A seta branca indica a trajetória geral simplificada do Jato de Baixo Nível (LLJ), modificado de (Bernal et al., 2016).

No estudo de Pupin (2014), o autor afirma que ocorreram mudanças nos ambiente deposicional nos Megaleques de São Lourenço e Cuiabá, que transformaram-se de canais entrelaçados para meandrantes, sendo os padrões entrelaçados predominantes no Pleistoceno e os padrões meandrantes predominantes no Holoceno. Tais mudanças teriam sido motivadas pelo aumento na umidade ocorrido a partir do Pleistoceno Superior, atribuídas a mudanças climáticas globais e locais. O autor utilizou de diversos métodos para tais conclusões e entre eles se destaca a concentração de ¹⁰Be cosmogênico, sendo este parâmetro capaz de inferir a taxa de erosão com o tempo. Sabendo que estas duas regiões são próximas ao local de estudo desta dissertação, estas afirmações podem ser expandidas para tentarmos supor quais as causas das mudanças deposicionais observadas. Assim nas seções apresentadas, podemos atribuir a radar fácies R3 como representação do período em que o ambiente deposicional era de canais entrelaçados e o de R2 como período em que o ambiente deposicional passou a ser de canais meandrantes como os atuais.

•

6. Conclusão

O presente estudo foi proposto para investigar a região do Pantanal, mais especificamente o lobo meandrante do Rio Taquari, no Megaleque de mesmo nome. A metodologia utilizada, o *Ground Penetrating Radar - GPR*, mostrou-se eficaz na tarefa de imagear a subsuperfície, sendo possível observar estruturas em uma profundidade próxima a 10 m, ou seja, podemos afirmar que o método GPR se mostrou eficaz neste estudo do Pantanal.

Foi possível identificar três radar fácies, denominadas R1, R2 e R3. R1 foi interpretada como limites contínuos de séries de laminação cruzada, que por suas dimensões não permitiram a observação de estratos cruzados dentro da resolução, e de níveis contínuos de depósitos de decantação. Provavelmente, tratam-se de depósitos de planície de inundação. R2 foi interpretada como barras, originadas com a deposição de sedimentos nas curvas do rio e o acúmulo dos sedimentos trazidos pelo fluxo do rio nas margens convexas. R3 foi interpretada como estratificações cruzadas acanaladas de dunas de médio a pequeno porte.

Outro intuito deste trabalho foi o de observar possíveis diferenças entres as três regiões investigadas, porém não foi observada nenhuma variação significativa nos padrões de refletores, o que pode ser explicado devido à pequena distância entre essas três regiões.

Foram observadas variações verticais de radar fácies em praticamente todas as seções. R1, a mais superficial, sendo-lhe atribuídas características de mais recente, e R3 a mais profunda e mais antiga. Estas variações na distribuição das radar fácies foram interpretadas como alterações de ambiente deposicional e as prováveis causas dessas alterações podem ser as mudanças climáticas ocorridas no passado, em escala global e regional, com a passagem de depósitos de rios de maior vazão, talvez entrelaçados, formados em um dos ciclos de maior precipitação do fim do Pleistoceno, passando a sistemas com características semelhantes aos atuais rios meandrantes.

Referências Bibliográficas

- Ab' Sáber, A. N., 1988. O Pantanal Mato-Grossense e a teoria dos refúgios. Revista Brasileira de Geografia 50: 9-57
- Ab' Sáber, A. N., 2006. Brasil: Paisagens de Exceção: o litoral e o Pantanal Mato
 Grossense: patrimônios básicos. Cotia SP: Ateliê Editorial. p. 11-78
- A.N.A., 2004. Implementação de Práticas de Gerenciamento Integrado de Bacia Hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai ANA/GEF/PNUMA/OEA: Programa de ANA ... [et al .]. Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado do Pantanal e Bacia do Alto Paraguai: Relatório Final/Agência Nacional de Águas — Brasília: TDA Desenho & Arte Ltda., p. 29-57
- Annan, A.P., 2001. Ground Penetrating Radar: Workshop Notes: Sensors e Software, Inc., p. 192.
- Assine, M. L., 2003. Sedimentação na Bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil. Tese de Livre-Docência, Universidade Estadual Paulista UNESP, Rio Claro.
 p. 106.
- Assine, M. L., 2009. Taquari: um rio mutante. In: Anais 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.1034-1040.
- Assine, M. L., 2010. Pantanal Mato-Grossense: uma paisagem de exceção. In: (ed.) A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber. p. 464 - 489.
- Assine M.L. and Soares P.C., 2004. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. Quaternary International, 114:23-34.

- Assine M.L., Merino E.R., Pupim F.N., Macedo H.A., Santos M.G.M., 2015. The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. Brazilian Journal of Geology, 45(3):475-489
- Assine, M.L., Merino, E.R., Pupim, F.N., Warren, L.V., Guerreiro, R.L., McGlue, M.M., 2016. Geology and geomorphology of the Pantanal Basin. In: Bergier, I., Assine, M.L. (Eds.), Dynamics of the Pantanal Wetland in South America. Springer International, Cham, Switzerland, p. 23–50.
- Bernal J.P., Cruz F.W., Strikis N.M., Wang X., Deininger M., Catunda M.C.A., Ortega-Obregon C., (...), Auler A.S. ,2016. High-resolution Holocene South American monsoon history recorded by a speleothem from Botuverá Cave, Brazil. Earth and Planetary Science Letters, 450, pp. 186-196
- Bridge, J. S., 2003. Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record, 491 pp., Blackwell, Malden, Mass.
- Cassidy N.J., 2009. Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids, in Jon, H.M. org., Ground Penetrating Radar Theory and Applications, Elsevier B.V., p. 41-67
- Daniels, D. J., 2004. Ground Penetrating Radar, 2nd Edition, : Radar, sonar and avionics, London, Institution of Electrical Engineers, p. 1 e 11
- Franke, D., Hornung, J., Hinderer, M., 2015. A combined study of radar facies, lithofacies and three-dimensional architecture of an alpine alluvial fan (Illgraben fan, Switzerland). Sedimentology 62, 57–86.
- Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D. and Annan, A. P.,2003. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review, Vadose Zone J., 2: 476–491.

- Jol, H. M., and Bristow, C. S.,2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. Geological Society, London, Special Publications, 211(1), p. 9-27
- LeClair, S.F. and Bridge, J.S., 2001. Quantitative interpretation of sedimentary structures formed by river dunes. J. Sed. Res., 71, 713–716.
- Lopes M., Fornari, M., Taioli F. 2013. Characterization of the architecture of fluvial bars of the Amazon and Tapajós rivers using GPR (ground penetrating radar). In: 13rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society. p. 7.
- Miall, A.D., 1988. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), southwest Colorado. Sediment. Geol., 55: 233-262,
- Miall, A.D., 1996. The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. New York, Springer-Verlag, p. 582
- Neal, A.,2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress: Earth-Science Reviews, v. 66, p. 261-330
- Olhoeft, G. R.,2002. Applications and Frustrations in Using Ground Penetrating Radar, Colorado School of Mines, IEEE AESS Systems Mugazinr, p. 12-20.
- Padovani C. V., 2010. Dinâmica das Inundações do Pantanal. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – USP/ESALQ. Piracicaba -SP. p. 174.
- Paola, C. and Borgman, L., 1991. Reconstructing random topography from preserved stratification, Sedimentology, 38, 553-565

- Porsani J.L., 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico-Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado - SP, Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita (UNESP), Rio Claro.
- Porsani, J.L.; Assine, M.L. ; Moutinho, L. , 2005. Application of GPR in the Study of a Modern Alluvial Megafan: the Case of the Taquari River in Pantanal Wetland, West-Central Brazil. Subsurface Sensing Technology and Applications, v. 6, n.2, p. 219-233.
- Pupim F.N. 2014.Geomorfologia e paleo-hidrologia dos megaleques dos rios Cuiabá e São Lourenço, Quaternário da Bacia do Pantanal MS Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro - SP, 109p.
- Reynolds, J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley, Chichester., p. 681-777
- Sambrook Smith, G.H., Ashworth, P.J., Best, J.L. Woddward, J., Simpson, G.J., 2006. The sedimentology and alluvial architecture of sandy braided South Saskatchewan river, Canada. Sedimentology, 53, p. 413-434.
- Sambrook Smith, G.H., Ashworth, P.J., Best, J.L., Lunt, I.A.,Orfeo, O, Parsons, D.R., 2009. The sedimentology and alluvial architecture of a large braid bar, Rio Paraná, Argentina. Journal of Sedimentary Research, 79, p. 629-642.
- Souza, L.A.P.; Porsani, J.L.; Souza, O.C.; Moutinho, L., 2002. Levantamento Experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 20, n.1, p. 67-72.

- Ussami, N.; Shiraiwa, S.; Dominguez, J. M. L., 1999. Basement reactivation in a sub-Andean foreland flexural bulge: The Pantanal wetland, SW Brazil. Tectonics, 18: 25-39.
- Vandenberghe J, and van Overmeeren RA. 1999. Ground penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands. Sedimentary Geology 128: 245–270.
- Wang, X., Edwards, R.L., Auler, A.S., Cheng, H., Kong, X., Wang, Y., Cruz, F.W., Dorale, J.A., Chiang, H.-W., 2017. Hydroclimate changes across the Amazon lowlands over the past 45,000 years. Nature 541:204–207.
- Zani H. 2008. Mudanças morfológicas na evolução do megaleque do Taquari: uma análise com base em dados orbitais. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista UNESP, Rio Claro. p. 85.