

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CURSO DE GEOLOGIA**

**LEONARDO TOZINI PALAGANO**

**ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA DA FORMAÇÃO FURNAS (BACIA DO PARANÁ) A  
PARTIR DE DADOS DE AFLORAMENTOS E RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO  
(GPR) NA REGIÃO DA SERRA DE SÃO LUIZ DO PURUNÃ/PR.**

**CURITIBA**

**2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CURSO DE GEOLOGIA**

**LEONARDO TOZINI PALAGANO**

**ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA DA FORMAÇÃO FURNAS (BACIA DO PARANÁ)  
A PARTIR DE DADOS DE AFLORAMENTOS E RADAR DE PENETRAÇÃO DO  
SOLO (GPR) NA REGIÃO DA SERRA DE SÃO LUIZ DO PURUNÃ/PR.**

Projeto apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (GC-132), sob orientação da Professora Doutora Carolina Danielski Aquino e coorientação da Professora Doutora Alessandra de Barros e Silva Bongioio.

**CURITIBA  
2020**

## **AGRADECIMENTOS**

Devo a todas as pessoas que me deram suporte ao longo de todos os anos que passei dentro da Universidade Federal do Paraná, desde os funcionários que trabalhavam para a instituição ser mantida funcionando como um ambiente agradável e seguro para estudar, até meus professores que ajudaram a me manter motivado para continuar estudando.

Logo mais eu gostaria de agradecer a instituição Universidade Federal do Paraná, por ter me concedido a chance de recomeçar o curso de Geologia, através do programa PROVAR. Com essa oportunidade tive a possibilidade de conhecer pessoas maravilhosas que me ajudaram a ver o mundo de maneira diferente, entre elas estão as minhas orientadoras Professora Doutora Carolina Danielski Aquino e a Professora Doutora Alessandra de Barros e Silva Bogiollo, que com todo seu entusiasmo, conhecimento e paciência conseguiram me guiar na reta final da graduação.

Sou grato ao pessoal do LABAP que me concederam um espaço para trabalhar antes do período de quarentena e me ajudaram a observar novos horizontes no meio acadêmico. Também sou grato ao pessoal do LPGA que pacientemente me ajudaram a trabalhar com os dados de geofísica, um agradecimento especial para o Rafael Canatta que me guiou em boa parte do trabalho.

Não poderia me esquecer de minha família: Filomena Maria Tozini Palagano, Rowilsson Paulo Palagano e Guilherme Tozini Palagano, que estavam presentes e me apoiando em todos os momentos de minha graduação. Nem de meus grandes amigos: Gabriel Luiz Salomão, William Cezar Czaya, Luciano de Oliveira Gonçalves, Bruno Fior, Gustavo Henrique Antoniazzi, Fernando Aparecido Dias Radomski, Lucas Pietro Galvan, Arthur Predebon, Mateus Hermann Mendes, Gregoryo Pacheco dos Santos Lima, Patrícia Hock, Karoline Anne Soares, Fernando Henrique Mizuno e outros que não cito aqui por falta de espaço.

Aos meus grandes companheiros da graduação, que estavam presentes durante todo o período: Matheus Pereira Nogueira e Silva, Murilo Henrique Taques Camargo, André Davi Ferreira, Rafaela Larissa da Cunha Rocha, Danilo Percicotte, Anderson Mendes da Fonseca e Winicius de Jesus Silva, gostaria de deixar a minha mais sincera gratidão.

## RESUMO

Desde a primeira metade do século XX a Formação Furnas, pertencente a Bacia Sedimentar do Paraná, tem sido alvo de estudos relacionados ao entendimento de seu ambiente sedimentar, alguns autores consideram seus depósitos como resultados de sistemas fluviais e outros como marinhos rasos com influência de maré. O objetivo do trabalho foi averiguar essa origem, analisando em detalhe os depósitos de barras cascalhosas e arenosas dessa formação em exposições da porção aflorante da borda Leste da Bacia do Paraná. Para tanto, foram realizadas análises de fácies e de suas respectivas associações, utilizando parâmetros como granulação, composição mineralógica, estruturas sedimentares, conteúdo icnológico, geometria e paleocorrentes. O método geofísico *Ground Penetrating Radar* (GPR) também foi empregado associado, em razão de analisar a geometria dos corpos e possivelmente as estruturas sedimentares desses depósitos em subsuperfície, e com isso, fazer comparações dessas características com os dados de afloramentos. Ao obter as linhas de GPR, foram utilizados *softwares* específicos para o processamento dos dados e extração de imagens com boa resolução para interpretação. Os trabalhos de campos foram realizados em 5 localidades na região de Balsa Nova e Campo Largo/PR, e para o desenvolvimento deste trabalho, foram escolhidos dois afloramentos chaves que instigavam a discussão do paleoambiente (fluvial x marinho raso). Foi constatado que, embora haja uma aparente uniformidade e monotonia litológica na formação geológica estudada, seus depósitos apresentam diferentes fácies sedimentares dentro de um pequeno intervalo estratigráfico. Mesmo não havendo a possibilidade de avaliar a continuidade lateral dos afloramentos neste trabalho, foram observadas feições dispares de um ponto estudado para o outro, o que levou a assumir que seus ambientes deposicionais também foram diferentes. Enquanto em um ponto há feições que claramente indicam uma forte ação costeira, no outro são observadas feições fluviais do tipo *braided*. Essa análise associando dados de afloramentos com dados de subsuperfície corrobora e contribui com o que vem sendo discutido na literatura entre diversos autores, de que a Formação Furnas provavelmente foi formada em um ambiente misto, em que há uma componente continental e uma marinha.

**Palavras-chave:** Formação Furnas; *Ground Penetrating Radar* (GPR), Ambiente Marinho Raso, Ambiente Fluvial.

## ABSTRACT

Since the first half of the twentieth century the Furnas Formation, a formation that belongs to the Sedimentary Basin of Paraná, has been the aim for many studies related to the understanding of its sedimentary environment. Some authors consider it as a result of a braided-type fluvial environment, other ones consider it as deposits from shallow-marine environments with a strong tidal influence. This study aims the verification of this origin by analyzing the gravelly bar-deposits and sandy bar-deposits that occur in the outcrops of the east border of Paraná Basin. The facial analysis was realized using features as granulation size, mineralogical composition, sedimentary structures, ichnologic contents, geometry and palaeocurrents. The geophysical method Ground Penetrating Radar GPR was also implemented in this study, with the aim of verify the geometries and possibly the sedimentary structures of these deposits in subsurface, and with that make comparisons between the subsurface data and surface data. By obtaining the radargrams with the fieldwork, it was used specific softwares for the purpose of processing the data and extraction of good resolution images for the interpretation. The fieldwork had been done in 5 locations between the municipalities of Balsa Nova and Campo Largo in the Paraná State, and for this work's development, 2 key-outcrops were chosen. It was verified that there isn't a litology monotony and uniformity like the literature has been concluding, the deposits have different sedimentary facies among a small range of stratigraphic record. Even with the impossibility of evaluate the lateral continuity of the deposits in this research, it was observed varied features from one studied location from another, which brought the study to also assume different depositional environments. While in one study point there is shallow-marine characteristics, in the other one the features are related to sheet-braided fluvial. This analysis using the outcrops along with the subsurface data support the argument of several authors that Furnas Formation probably were deposited in a kind of mix-environment, with shallow-marine components and continental components.

**Keywords:** Furnas Formation; Ground Penetrating Radar (GPR), Shallow-Marine Environment, Fluvial Environment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de rochas sedimentares formando depósitos de barra arenosa-Boggs (2014).....	1
Figura 2: Localização da Área de Estudo. O ponto 1 - Fazenda São José; Ponto 2 - Fazenda Thalia – IBGE (2020).....	4
Figura 3: Campos Gerais – SEMA & IAP (2004).....	5
Figura 4: Cânions cortando o segundo planalto – SEMA & IAP (2004). ....	5
Figura 5: Cornija separando o Primeiro Planalto do Segundo Planalto – SEMA & IAP (2004).....	5
Figura 6: Distribuição das unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná – Modificado de Milani (1997).....	6
Figura 7: Migração dos continentes entre o Siluriano e o Devoniano – Stanley (2009). .....	8
Figura 8: Diagrama cronoestratigráfico do Grupo Paraná e do Grupo Rio Ivaí – Sedorko <i>et al.</i> (2018).....	9
Figura 9: Área de ocorrência da Formação Furnas – Modificado de Assine (1996)..	11
Figura 10: Modelo para descrição e definição de radarfácies – Modificado de Campbell (1967), Mitchum <i>et al.</i> (1977), Allen (1982) por Neal (2004).....	20
Figura 11: Fácies sedimentares psefíticas observadas em campo: a) Afloramento da Fazenda Thalia em que são observadas as fácies Sm e St; b) Afloramento da Fazenda São José em que podem ser observadas as fácies St e Sm; c) Afloramento na Fazenda São José com a fácies St com estruturas em médio porte; d) Detalhe no afloramento da Fazenda São José apresentando a fácies St de pequeno porte; e) Detalhe em afloramento da Fazenda Thalia com fácies Sh; f) Afloramento da fazenda Thalia em que são observadas as fácies St e Sh com estruturas de porte médio. Em vermelho são representadas as estratificações cruzadas. Em preto são apresentadas as geometrias dos depósitos.....	23
Figura 12: Fácies sedimentares observadas em campo: a) Litofácies Sit com o icnofóssil Thalassinoides; b) Afloramento da Fazenda Thalia onde podem ser observadas as litofácies Ld, Gd, Sh e Sm; c) Afloramento na Fazenda Thalia com as litofácies Gd, Ld, Sm e St; d) Afloramento da Fazenda São José apresentando as litofácies Gt e St; e) Detalhe em afloramento da Fazenda São José com as litofácies St e Gt; f) Afloramento da fazenda São José em que são observadas as litofácies St e Gl. Em vermelho claro são representadas as estratificações cruzada, em azul são representados os clastos seixosos indicando regiões ortoconglomeráticas, em vermelho escuro são apresentadas estruturas de defomação interna nos depósitos rudáceos, em roxo são apresentadas estruturas desorganizadas nos lamitos e	

estruturas em chamás. Em verde claro e tracejado está representado os icnofósseis do icnogênero *Thalassinoides*. .....26

Figura 13: Associação das radarfácies Rf1, Rf2, Rf3 e Rf4 que são observadas na linha 282 com o afloramento principal observado na Fazenda Thalia. O polígono rosa representa a Rf1, o marrom claro representa a Rf2, o marrom escuro representa a Rf3, e o branco representa a Rf4. Em preto e em vermelho estão representados os refletores observados na linha 282. ....30

Figura 14: Critérios para descrição e interpretação da radarfácies Rf5 a partir da linha 277 [Fazenda São José]. Na linha em verde claro é representada a região de intersecção do afloramento em superfície com a radarfácies Rf5 descrita. A linha preta, em meio aos polígonos, representa os refletores observados na linha 277. Entre os polígonos observados a Rf5 é representada pelos amarelos, enquanto a Rf4 é observada com cor branca, e a Rf2 com cor marrom claro. A) Região onde a Rf5 foi interpretada. B) Zoom para a região em que a radarfácies foi interpretada observada na Figura 14<sup>a</sup>. .....31

Figura 15: Foco para a região em que a Rf5 foi descrita. A) Detalhe para a região onde a Rf5 foi interpretada. Os traços pretos e finos indicam refletores, O traço grosso e roxo representa onde a linha 277 foi adquirida, em amarelo está a radarfácies Rf5. B) Detalhe para a região onde a Rf5 foi interpretada em uma foto em maior resolução. O traço roxo e grosso representa onde a linha 277 foi traçada, os traços em vermelho representam as estruturas sedimentares associadas a Rf5, no caso são estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo. ....32

Figura 16: Sumário das radarfácies descritas. Nas imagens à esquerda são mostrados os radargramas representativos para cada radarfácies. Nas imagens à direita são apresentados os refletores que definem o padrão observado nas radarfácies em traços vermelhos, e também são mostrados seus respectivos radargramas. E através dos traços vermelhos nas imagens da direita, as estruturas sedimentares são representadas e correlacionadas à essas radarfácies: a) é mostrada a radarfácies Rf1 e as estruturas observadas são depósitos maciços ou com estratificação cruzada acanalada de baixo ângulo; b) é mostrada a Rf2 e como seus refletores não refletem as estruturas observadas em afloramento; c) apresenta a radarfácies Rf3 em que as estruturas observadas são majoritariamente estratificações cruzadas de baixo ângulo; d) representa a radarfácies Rf4 e as estruturas observadas são estratificações cruzadas acanaladas de baixo e alto ângulo; e) é mostrada a radarfácies Rf5 e as estruturas observadas são estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo .....35

Figura 17: Representação do afloramento da Fazenda São José, Campo Largo, PR. Em vermelho são representadas as estruturas sedimentares, em preto são mostradas as geometrias dos depósitos. Notar a grande extensão e forma tabular dos depósitos na região mais afastada da foto – Foto de Aquino (2019). .....37

Figura 18: Seção tipo do afloramento da Fazenda São José, Campo Largo, PR. As letras em preto representam as estruturas observadas ao longo no afloramento e representadas na seção, como nas fotos. Nas fotos as linhas pretas representam a

geometria, enquanto as linhas vermelhas representam as estratificações, em azul são representados os depósitos residuais. .... 38

Figura 19: Diagrama de Rosetas das paleocorrentes medidas na Fazenda São José..... 39

Figura 20: Afloramento na Fazenda São José (A) Representação das estratificações cruzadas acanaladas em vermelho. (B) Detalhe para as estratificações cruzadas (em vermelho) interrompidas por superfícies de reativação (preto). .... 40

Figura 21: Interpretação da linha 275 adquirida na Fazenda São José, Campo Largo, PR. A) linha 275 processada através do software Reflexw. b) radarfácies na linha 275 observadas a partir da análise dos refletores; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 275 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento ..... 41

Figura 22: Interpretação da linha 277 adquirida na Fazenda São José, Campo Largo, PR. A) linha 275 processada através do software Reflexw. . b) radarfácies na linha 277 observadas a partir da análise dos refletores; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 277 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento ..... 42

Figura 23: Afloramento da Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. As linhas em vermelho representam as estruturas sedimentares observadas no afloramento. As linhas em preto separam as geometrias observadas através do formato dos depósitos. A) O afloramento da Fazenda Thalia; b) as geometrias interpretadas através da análise do afloramento da Fazenda Thalia.– Foto de Aquino (2019). .... 46

Figura 24: Seção tipo do afloramento da Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. As letras em preto representam as estruturas observadas ao longo no afloramento e representadas na seção, como nas fotos. Nas fotos as linhas pretas representam a geometria, enquanto as linhas vermelhas representam as estratificações, em azul são representados os depósitos residuais, em verde tracejado é mostrada a região onde foi interpretada os icnofósseis thalassinoides. Em roxo são representadas as estruturas de deformação analisadas na litofácies Ld..... 47

Figura 25: Diagramas de Rosetas das paleocorrentes medidas na Fazenda Thalia: a) das estratificações cruzadas acanaladas s; b) das estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe. .... 48

Figura 26: Superfícies de reativação observadas no afloramento da fazenda Thalia. As superfícies de reativação estão marcadas em preto. As linhas em vermelho representam estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo relacionadas as fácies St..... 49

Figura 27: – Interpretação da linha 281 adquirida na Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. A) linha 281 processada através do software Reflexw®; b) radarfácies na linha 281 observadas a partir da análise dos refletores; c) Interpretação dos depósitos de

subsuperfície na região da linha 281 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento .....51

Figura 28: Interpretação da linha 282 adquirida na Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. A) linha 282 processada através do software Reflexw®; b) radarfácies na linha 282 observadas a partir da análise dos refletores; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 282 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento .....52

Figura 29: Geometrias analisadas tanto no afloramento da Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR, como na sua respectiva linha de GPR (linha 282). .....53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das fácies observadas. ....	21
Tabela 2 - Linhas de GPR de acordo com suas localidades. ....	27
Tabela 3– Radarfácies com suas respectivas descrições e interpretações .....	29

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.2. ÁREA DE ESTUDO.....	3
<b>2. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA</b> .....	<b>6</b>
2.1. BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ.....	6
2.2. SUPER-SEQUÊNCIA PARANÁ.....	7
2.3. GRUPO PARANÁ.....	9
2.4. FORMAÇÃO FURNAS.....	10
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E TRABALHO GEOLÓGICO CAMPO.....	16
3.2. ANÁLISE FACIOLÓGICA .....	17
3.3. PALEOCORRENTES .....	18
3.4. RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR) .....	18
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>20</b>
4.1. ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA .....	20
4.1.1. Arenitos.....	22
4.1.2. Lamitos .....	24
4.1.3. Conglomerados.....	24
4.2. ANÁLISE EM GPR .....	27
<b>5. DISCUSSÕES</b> .....	<b>36</b>
5.1. PONTO 1 – FAZENDA SÃO JOSÉ.....	36
5.2. PONTO 2 – FAZENDA THALIA .....	44
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>56</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Estruturas sedimentares são feições observadas em todas as escalas de rochas sedimentares (Figura 1), sendo geradas por uma grande variedade de processos, tais como fluxos gravitacionais, fluxos trativos subaquosos e subaéreos, deformação em condições reológicas plásticas, decantação e até mesmo atividade biogênica. São de grande importância para estudos sedimentológicos, pois refletem as condições ambientais prevalentes no momento de sua deposição, sendo consideradas ferramentas indispensáveis na reconstrução de paleoambientes (Boggs 2014).



Figura 1 - Exemplo de rochas sedimentares formando depósitos de barra arenosa- Boggs (2014)

O senso comum leva a crer que depósitos sedimentares semelhantes tendem a ser formados por processos deposicionais parecidos e que a recíproca é verdadeira. Porém ao analisar rochas sedimentares em maior detalhe é possível averiguar que muitos depósitos similares entre si foram formados em ambientes totalmente distintos. Dentre os fatores a serem avaliados em um depósito sedimentar estão a granulação, a geometria, a escala trabalhada, os conteúdos fossilífero e icnológico, e os padrões de paleocorrentes (Nichols 2009). A combinação dessas características nos fornecem pistas valiosas, mesmo que sucintas, de como discriminar, por exemplo, depósitos de barras cascalhosas/arenosas originadas em um ambiente fluvial de um depósito semelhante originado em um ambiente de maré.

O método de *Ground Penetrating Radar* (GPR) é bastante utilizado no reconhecimento de estruturas sedimentares em ambientes modernos tanto de origem fluvial como costeiros (Neal 2004, Bogo *et al.* 2015, Leandro *et al.* 2019) os quais trazem informações valiosas na caracterização desses ambientes em especial a geometria e feições internas dos depósitos de barras cascalhosas e/ou arenosas. No entanto, ainda são poucos os estudos que utilizam essa ferramenta de forma efetiva na caracterização dos depósitos antigos, ainda mais associados a dados de afloramentos.

O material de estudo deste trabalho faz parte da Formação Furnas (porção siluro-devoniana da Bacia Sedimentar do Paraná), a qual apresenta uma monótona composição litológica em quase toda a sua extensão. Sua granulação varia de arenito médio a conglomerático, com coloração branca a amarelada, e composição mineralógica quartzosa e caulínica. As estruturas sedimentares mais observadas são estratificações cruzadas acanaladas e tabulares de médio a grande porte (Schneider *et al.* 1974, Assine 1999). Sua idade de sedimentação sempre foi considerada duvidosa, e foi somente com os trabalhos de Sedorko *et al.* (2017) baseados em icnofósseis que, ao usar conceitos atuais de icnologia, como mostrados na publicação de Seilacher (2007), conseguiram correlacionar as camadas mais basais da Formação Furnas ao final do Llandoveryano do período Siluriano.

A Formação Furnas, tem sido alvo de estudos relacionados ao entendimento de seu ambiente sedimentar desde o começo do século XX, e até hoje suas interpretações são controversas. Isso se dá principalmente devido à sua constância litológica composta basicamente de arenitos e arenitos cascalhosos e a falta de fósseis corpóreos que possam atestar a sua origem paleoambiental. Zalán *et al.* (1987a) e Pereira *et al.* (1992) defenderam que seu ambiente de deposição seria sumariamente fluvial, já Fúlfaro *et al.* (1982) e Ciguel (1989) defenderam um ambiente inteiramente marinho. Os trabalhos mais recentes (Borgui 1993, Assine 1996, Bergamaschi 1999; Carneiro 2011, Sedorko 2017) defendem um ambiente misto no qual há influência de depósitos continentais e costeiros com influência de maré.

### 1.1.OBJETIVOS

O objetivo principal desta monografia é contribuir para o entendimento paleoambiental da Formação Furnas a partir da caracterização de depósitos de barras

cascalhosas e arenosas de duas localidades, para corroborar ou não com a hipótese de que a Formação Furnas possui influência de maré na sua sedimentação.

Para tanto, os objetivos específicos são os seguintes:

- Caracterização faciológica em detalhe de ambas localidades.
- Organização das fácies sedimentares em associações de fácies.
- Análise de feições em subsuperfície (geometria dos corpos, padrões das estruturas sedimentares mais significativas) a partir da interpretação de linhas obtidas por *Ground Penetrating Radar* (GPR).
- Comparação dos dados de afloramentos com os dados de subsuperfície.

## 1.2.ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se concentra na faixa aflorante da Formação Furnas na região metropolitana de Curitiba/PR. No total foram realizados trabalhos de campo em 5 localidades, contudo para o desenvolvimento deste trabalho foram selecionados dois afloramentos chaves (Figura 2) que instigavam a discussão do tipo de paleoambiente de deposição (fluvial x marinho raso/maré). A área de estudo localiza-se entre a divisa dos municípios de Balsa Nova, Campo Largo, cerca de 30 km de Curitiba seguindo a BR-277, na direção Curitiba - Ponta Grossa.

Essa região é situada na divisa entre duas unidades morfoesculturais: o Primeiro e o Segundo Planalto Paranaense, divididos pela Serra de São Luiz do Purunã. Na porção oriental da serra ocorre o Planalto de Curitiba que apresenta formas predominantes de topos alongados e aplainados, com vales em forma de “V”. Na porção ocidental ocorrem os Campos Gerais (Figura 3), em que o padrão de relevo ocorre como topos de cuevas, sendo cortados em cânions (Figura 4) revelando as cornijas (Figura 5) que migram para o primeiro planalto, para a subunidade morfoescultural do Planalto de Curitiba (Paraná 2004, 2006).

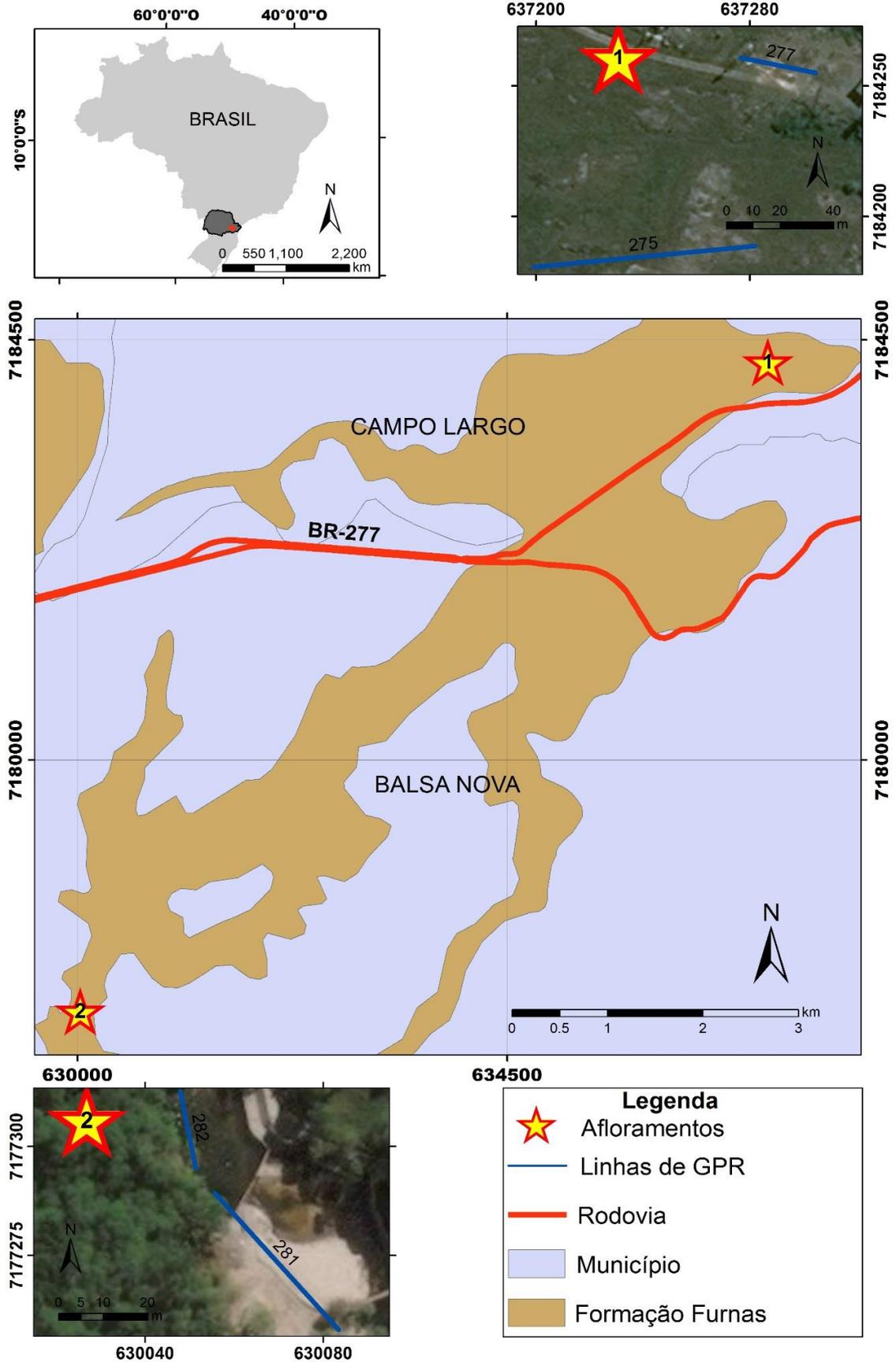


Figura 2 - Localização da Área de Estudo. O ponto 1 - Fazenda São José; Ponto 2 - Fazenda Thalia – IBGE (2020)



Figura 3 – Campos Gerais – SEMA & IAP (2004).



Figura 4 – Cânions cortando o segundo planalto – SEMA & IAP (2004).



Figura 5 – Cornija separando o Primeiro Planalto do Segundo Planalto– SEMA & IAP (2004).

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

### 2.1. BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ

A Bacia Sedimentar do Paraná apresenta uma área de 1.500.000 km<sup>2</sup>, com cerca de 1.000.000 km<sup>2</sup> no território brasileiro e o restante atingindo o Paraguai, o Uruguai e a Argentina, onde a bacia é chamada de Bacia Sedimentar do Chaco-Paraná (Figura 6). A Bacia possui forma ovalada de maneira geral, com o eixo principal em direção norte-sul, e seu depocentro coincide com o Rio Paraná, onde há cerca de 8.000 metros de rochas sedimentares e vulcânicas depositadas. Seu contorno atual é definido por limites erosivos. A erosão situada no flanco oriental é relacionada ao soerguimento crustal do rifte atlântico sul, já a do flanco ocidental é relacionada com o arco de assunção (Assine 1996, Milani 1997, 2007a).

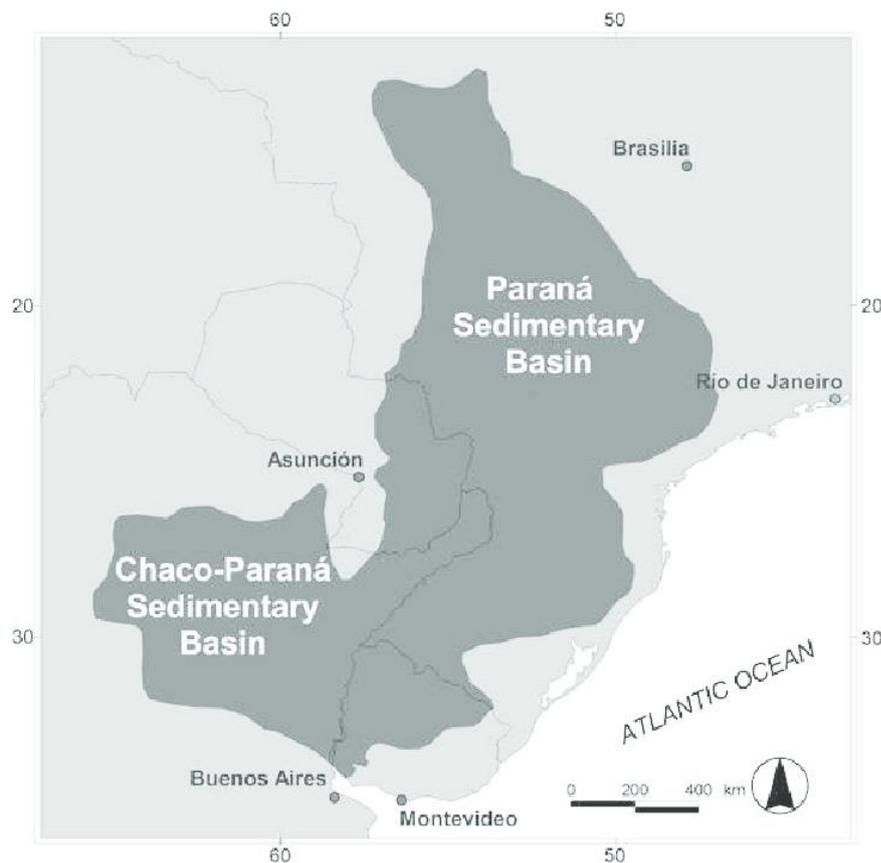


Figura 6 - Distribuição das unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná - Modificado de Milani (1997).

A Bacia Sedimentar do Paraná é uma bacia intracratônica, formada por eventos cíclicos de subsidência e soerguimento, que geraram respectivamente sequências deposicionais e discordâncias. Seus primeiros registros litológicos remontam o Período Ordoviciano. Sua origem é controversa, com diversas interpretações divididas entre pesquisadores. Fúlfaro *et al.* (1982) definem que a Bacia teria sido formada a partir de calhas aulacógenas pré-ordovicianas, com orientação NW-SE, e estas calhas seriam semelhantes à

Bacia Sedimentar de Castro. Já Zalán *et al.* (1987b) sugerem que a sedimentação ocorreu por conta de uma subsidência neo-ordoviciano, que possivelmente ocorreu através do resfriamento térmico dos eventos brasileiros. Milani *et al.* (2007a) defendem que a origem da bacia é intimamente relacionada com as orogênicas ocorridas no Gondwana ao longo do tempo e que depressões alongadas na direção NE-SW deveriam ter originado a sinéclise.

A bacia possui estratos que variam desde o Período Neo-Ordoviciano até o Neo-Cretáceo, com uma totalidade de 385 Ma de história de sedimentação. Seis grandes ciclos sedimentares teriam ocorrido na bacia ao longo desse período, conforme foram documentados por Soares *et al.* (1974). Milani (1997) classificou esses ciclos como super-sequências, que são intervalos rochosos que materializam ciclos de deposição de sedimentos que ocorreram durante milhões de anos, registrando o que ocorriam em seu ambiente e no globo. Essas super-sequências são limitadas na base e no topo por discordâncias de caráter regional, e são denominadas de i) sequência Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), ii) sequência Paraná (Devoniano), iii) sequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), iv) sequência Gondwana II (Meso a Neotriássico), v) sequência Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e vi) Bauru (Neocretáceo). Cada uma é relacionada a um evento tectônico que proporcionou uma nova fase de subsidência da Bacia Sedimentar do Paraná, criando espaço para novas deposições (Milani *et al.* 2007a, Pereira *et al.* 2012).

## 2.2. SUPER-SEQUÊNCIA PARANÁ

A Super-sequência Paraná, foi definida por Milani (1997) a partir do trabalho de Soares *et al.* (1974), que subdividiam a Bacia Sedimentar do Paraná em 5 sequências deposicionais, seguindo as ideias da proposição de Sloss de 1963, propostas para as grandes sinéclises paleozoicas do Gondwana, como a bacia de Solimões, do Parnaíba e a do Amazonas. Nesse trabalho os autores definiram a bacia como um ciclo deposicional, de primeira ordem, subdividida em 5 ciclos de segunda ordem, do beta ao zeta, sendo que a Supersequência Paraná refere-se à sequência gama da bacia.

A Super-sequência Paraná registra os depósitos formados entre o final do Llandoveryano até o final do Frasniano. Durante esse intervalo o Gondwana encontrava-se no hemisfério sul e a Bacia Sedimentar do Paraná estava situada próxima ao polo (Figura 7). A bacia era aberta para o oceano, como um golfo voltado para a direção da atual feição dos Andes. Durante esse período de tempo o Arco de Assunção soergueu e isolou a área de sedimentação da bacia, e enquanto ocorria a Orogenia Oclóyca, a subsidência das calhas da bacia se estabeleceu onde o Grupo Rio Ivaí se depositou, criando espaço de acomodação

para a deposição da Supersequência Paraná (Fúlfaro *et al.* 1982, Milani 1997, Sedorko *et al.* 2017).

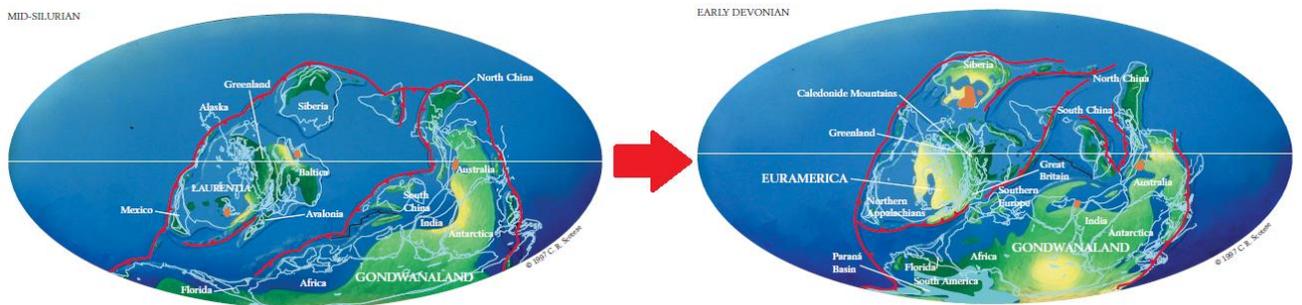


Figura 7 – Migração dos continentes entre o Siluriano e o Devoniano – Stanley (2009).

O embasamento da bacia ainda era compartimentado de maneira semelhante ao seu arcabouço original. Esse embasamento condicionou a sedimentação da Formação Furnas na borda Leste da bacia para se depositarem suavemente na direção SW. Nesse intervalo de tempo a individualização do arco de assunção foi um aspecto paleogeográfico significativo já que balizou a Bacia do Paraná a oeste, tornando-a uma bacia confinada, limitando a incursão marinha ou pelo sudoeste ou pelo nordeste, tema essa ainda discutido na literatura (Borgui 1993).

O período de deposição da Formação Furnas pode ser considerado como de aquiescência tectônica na região da Bacia do Paraná, foi somente nas fases posteriores da deposição da Formação Ponta Grossa que ocorreu um tectonismo significativo, ocorrendo soerguimento de dois arcos estruturais, o Arco de Três Lagoas e o Arco de Campo Grande. Esses arcos teriam individualizado a bacia em duas sub-bacias, a sub-bacia de Apucarana (sul) e de Alto-Garças (norte), cada uma com suas características faciológicas próprias (Zalán *et al.* 1987<sup>a</sup>, Assine, 1996).

A Supersequência Paraná foi subdividida em ciclos de menor ordem por diversos autores. O trabalho de Pereira *et al.* (1992) dividiu a supersequência em 2 ciclos menores, e Assine (1996) subdividiu-a em 4 sequências de mais alta frequência. Já Bergamaschi (1999), Bergamaschi & Pereira (2001) e não a subdividiram, mantiveram apenas um ciclo para todo o período, com diversos tratos de sistemas deposicionais, representando o que seria considerado como um ciclo deposicional no trabalho de Assine (1996). Os trabalhos de Sedorko *et al.* (2017), mais recente, a dividiu-a em quatro sequências estratigráficas (Figura 8). A primeira ocorreria no início do Siluriano (Llandovery ao Wenlock), representado pelas duas primeiras unidades da Formação Furnas. A segunda ocorreria entre o fim do Siluriano (Pridoli) ao início do Devoniano (Eoemsiano), representado pela unidade superior da

formação sotoposta que gradaria até o Membro Jaguariaíva da Formação Ponta Grossa. A terceira sequência ocorre do Neoemiliano ao Neoeifeliano, representada pelo Membro Tibagi e a base do Membro São Domingos dessa mesma formação. A quarta sequência ocorre entre o Neoeifeliano ao Eogivetiano, representada pela parte superior do Membro São Domingos da Formação Ponta Grossa.

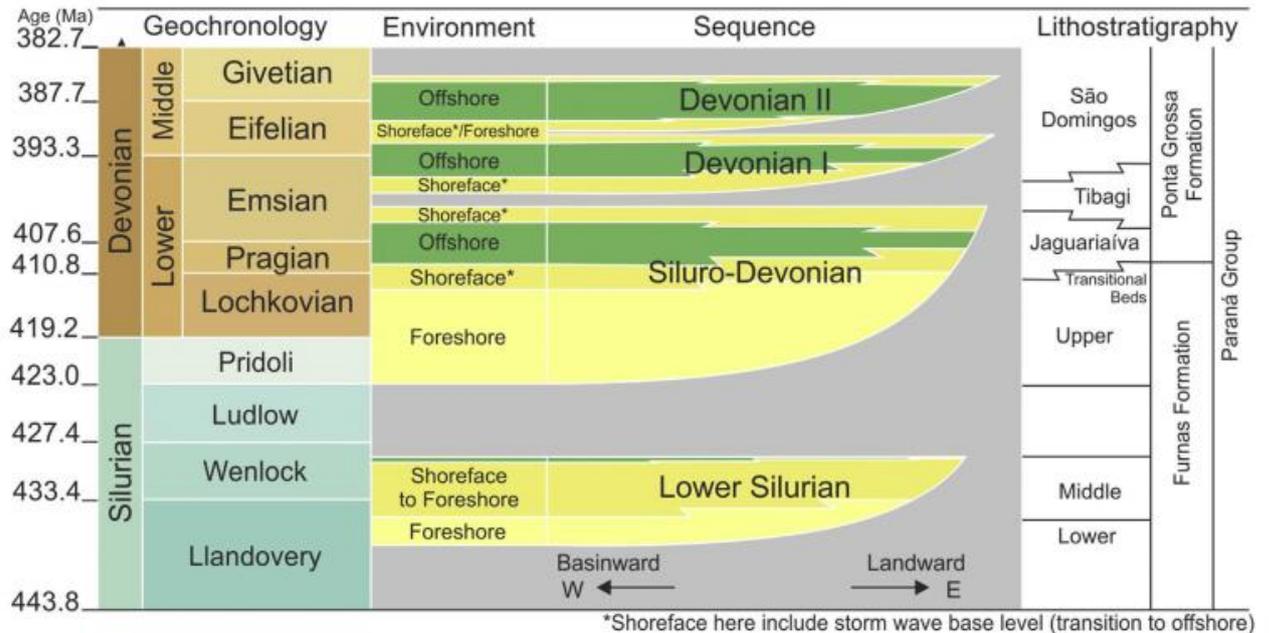


Figura 8 – Diagrama cronoestratigráfico do Grupo Paraná e do Grupo Rio Ivaí – Sedorko *et al.* (2018).

### 2.3. GRUPO PARANÁ

O primeiro trabalho que tentou descrever as rochas do Grupo Paraná como uma entidade geológica única ou associada, foi o trabalho de Oliveira (*Apud* Assine), em 1912 que separou esse grupo em três unidades, como Arenito Furnas, Folhelhos de Ponta Grossa e Arenito Tibagi. Foi só em 1948 que Petri denominou as duas formações como são conhecidas hoje, a Formação Furnas e a Formação Ponta Grossa. Em 1967, Lange e Petri formalizaram essa divisão tripartite da Formação Ponta Grossa, da base para o topo, sendo respectivamente, o membro Jaguariaíva, o membro Tibagi e o Membro São Domingos. Suas seções aflorantes ocorrem apenas na borda leste da bacia, no segundo planalto paranaense e na borda norte-noroeste, no estado do Mato Grosso, onde podem ser observadas as rochas da Chapada dos Guimarães (Paraná 2004 e 2006, Ross 2014).

A base do Grupo Paraná é separada da Formação Vila Maria, de idade neo-oroviciano a eo-siluriana, por uma discordância regional (Assine, 1996; Milani, 1997; Milani *et al.* 2007a). Seu topo é separado do Grupo Itararé, de idade neo-carbonífera a eo-permiana, por outra discordância de caráter regional (Schneider *et al.* 1974).

O grupo apresenta espessura máxima de 818 metros em Cândido de Abreu e 920 metros na localidade de Apucarana, ambos do Estado do Paraná. A Formação Furnas apresenta espessura média de 250 metros e três unidades não oficiais são reconhecidas (unidade inferior, intermediária e superior). Todas as unidades são de composição predominantemente arenosa a conglomerática, contudo a unidade intermediária apresenta um caráter fracamente pelítico, com delgadas camadas de siltito intercaladas com as sucessões de granulometria mais grosseira (Assine 1996).

A Formação Ponta Grossa apresenta espessura média de 600 metros, e em geral sua litologia predominante é pelítica (siltitos e folhelhos). Suas estruturas sedimentares mais características são laminação paralela e *ripples*. Possui conteúdo fossilífero rico, e chega a possuir Carbono Orgânico Total (COT) de 15% em alguns horizontes. Essa formação é dividida em três membros, sendo eles o membro Jaguariaíva, Tibagi e São Domingos. Sendo o membro Tibagi o único membro de caráter areno-conglomerático da formação geológica (Assine 1996, Milani 2007b).

Na literatura há uma ampla discussão sobre a passagem entre as duas formações, se houve um hiato e uma erosão ou se a deposição foi de forma contínua acompanhando uma transgressão marinha. Em locais como na cidade de Tibagi/PR ou no estado de Mato Grosso, a discordância erosiva entre as duas formações é visível (Zalán *et al.* 1987<sup>a</sup>, Milani 1997). Em subsuperfície, analisando perfis gamaespectrométricos há um gradativo incremento na argilosidade nas camadas que transicionam da Formação Furnas para a Formação Ponta Grossa (Milani 2007b).

#### 2.4.FORMAÇÃO FURNAS

A Formação Furnas aflora nas regiões leste e norte-noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná. Na região oriental apenas cerca de 4.300 km<sup>2</sup> de suas rochas são expostas em superfície, apresentando formato de Lua Crescente. Enquanto na região setentrional da bacia cerca de 20.000 km<sup>2</sup> são aflorantes. A área completa que a formação abrange, contando a área superficial e em subperfície, compreende aproximadamente 850.000 km<sup>2</sup> (Figura 9), 60% da área total da Bacia Sedimentar do Paraná. Possui uma geometria tabular, sua espessura varia em torno de 250 metros a 300 metros em subsuperfície. A região de Assunção (Paraguai) pode atingir até 325 metros. Já nas regiões aflorantes esses depósitos possuem menos de 200 metros de espessura na região leste, e na porção norte-noroeste da bacia a sucessão não supera os 100 metros de espessura (Assine 1996, Santos 2000).

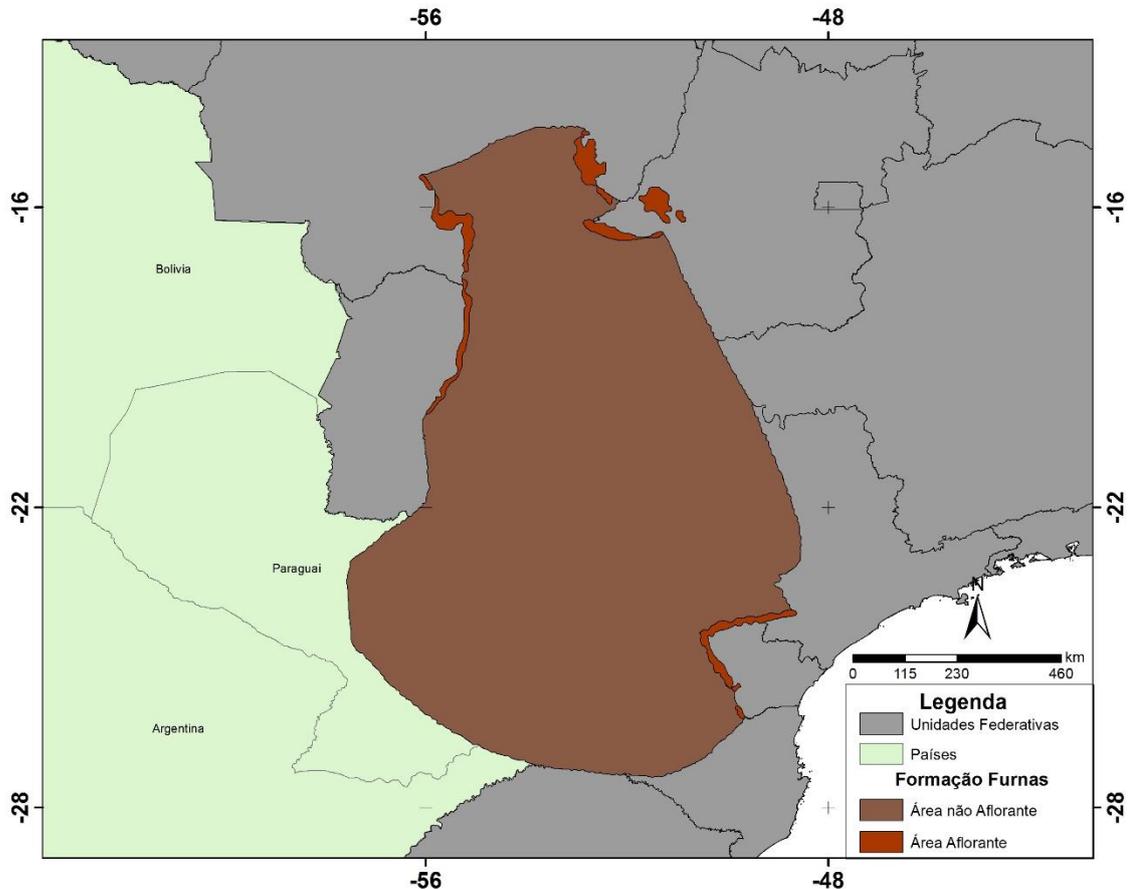


Figura 9 – Área de ocorrência da Formação Furnas – Modificado de Assine (1996).

A Formação Furnas trata-se de um depósito siliciclástico, frequentemente descrito como uma formação monótona, representada por arenitos e conglomerados. Os arenitos são quartzosos, feldspáticos, com cimentação silicosa e granulação variando de média a grossa, tendo uma seleção textural moderada. Já os conglomerados podem ser clastos sustentados ou matriz sustentados, com o arcabouço representado principalmente por seixos, de composição quartzosa, com grãos não-esféricos e subarredondados. Suas estruturas sedimentares mais comuns são estratificações cruzadas tabulares e acanaladas, subordinadamente ocorrem estruturas como estratificação plano-paralela, estratificação cruzada do tipo espinha de peixe, *ripples*, simétricas e assimétricas. (Schneider *et al.* 1974; Assine 1999; Carneiro 2011).

A Formação Furnas foi primeiramente descrita como Arenito Furnas por Oliveira em 1912, definida assim para identificar os depósitos psefíticos que eram observados nas escarpas da Serra das Furnas e de Serrinha, Estado do Paraná.

Neste momento, as rochas foram descritas como uniformes tanto em espessura quanto em questões granulométricas (Schneider *et al.* 1974). Ao longo do século XX as interpretações sobre a Formação Furnas, suas relações com as formações sedimentares sobrepostas e sotopostas e seu ambiente deposicional foram evoluindo ao longo do tempo, mas sempre foram alvo de polêmica e discussão (Schneider *et al.* 1974, Fúlfaro *et al.* 1982, Zalán *et al.* 1987a, Ciguel, 1989, Pereira *et al.* 1992, Borgui 1993, Assine 1996, Bergamaschi 1999, Carneiro 2011, Sedorko *et al.* 2017).

Desde os primeiros estudos, a Formação Furnas era tida como afossilífera, sendo reconhecidos apenas traços fósseis. Desde então houve discussões entre pesquisadores para tentar definir a idade de deposição. Foi somente ao longo da década de 80 que foi possível definir uma amarração cronoestratigráfica da porção superior correlacionando o conteúdo esporos e palinomorfos com o conteúdo observado na Formação Ponta Grossa. Porém os depósitos inferiores ainda permaneceram sem amarração estratigráfica, sendo que praticamente todos os autores inferiam que a deposição da Formação Furnas poderia ter ocorrido entre o Siluriano Inferior e o Devoniano Inferior (Assine 1996, Bergamaschi 1999).

Atualmente, o trabalho de Sedorko *et al.* (2017), usando a concepções de traços fósseis atuais (Seilacher, 2007), conseguiram datar de maneira mais precisa os depósitos inferior e intermediário da Formação Furnas, a partir da análise de afloramentos ricos em icnofósseis, como na localidade de Sítio Cercado, no Paraná, já observada por Ciguel *et al.* (1989). Esses estudos possibilitam a amarração da base da Formação Furnas para o Siluriano Inferior (Llandoveryano).

Uma discussão bastante polêmica sobre a Formação Furnas é em respeito ao seu ambiente deposicional, mas foi somente ao final do século XX que a formação recebeu maior notoriedade pelos pesquisadores. Estes deram-na enfoque levando em conta os trabalhos de Posamentier *et al.* (1988) sobre estratigrafia de sequências, elaborando seções sedimentares criteriosas detalhando a variação granulométrica e classificando as fácies desta formação. Considerando os conceitos sobre tratos de sistemas deposicionais esses trabalhos mais atuais conseguiram subdividir a Formação Furnas em 3 unidades bem definidas e reconhecidas regionalmente (Pereira *et al.* 1992, Borgui 1993; Assine 1996, Bergamaschi 1999).

Os ambientes deposicionais definidos pelos autores variam entre fluvial do tipo *braided*, ambiente marinho raso dominado por marés e ambientes intermediários como estuarino ou deltaico. Com a evolução das interpretações três unidades informais foram separadas entre os estratos da Formação Furnas. Cada uma apresentando características sedimentológicas, faciológicas e paleontológicas diferentes. No entanto, conforme mencionado anteriormente, ainda não há um consenso no que diz respeito ao seu ambiente deposicional, uma vez que, além de ser uma unidade sem muita variação litológica, até o momento não há fósseis corpóreos que possam atestar a sua origem paleoambiental. (Schneider *et al.* 1974, Zalán *et al.* 1987a; Pereira, *et al.* 1992, Assine 1996, Bergamaschi 1999; Bergamaschi & Pereira 2001, Lobato & Borgui 2005; Carneiro *et al.* 2011, Sedorko *et al.* 2017).

A primeira unidade tem cerca de 50 metros de espessura, e possui contatos planos e erosivos com a Formação sotoposta. Esta unidade é composta por arenitos médios a muito grossos, quartzosos, feldspáticos e caulíníticos, com grãos angulosos a subangulosos. Muitas vezes há grânulos, seixos e calhais embebidos nessa matriz mais arenosa. As camadas variam entre 0,5 e 1,5 metros de espessura, com geometria tabular predominante, e subordinadamente com geometrias lenticulares e cuneiformes. Ocorrem camadas de ortoconglomerado ao longo de toda essa unidade basal de maneira não uniforme, mas ocorrem com maior frequência na base da sucessão. Estas feições sempre ocorrem associadas e migram entre si, tanto verticalmente como lateralmente (Assine 1996, 1999, Bergamaschi 1999, Carneiro 2011).

As estruturas sedimentares mais comuns são estratificações cruzadas acanaladas e tabulares nos arenitos e estratificação plano-paralelas nos conglomerados. São observados pequenos *lags* conglomeráticos ao longo das camadas ou entre sets das estratificações. De maneira geral, a primeira unidade possui um caráter de granodecrescência ascendente, sendo cada vez menos frequente a presença de conglomerados na região de transição entre a primeira e a segunda unidade, (Assine 1996, 1999, Bergamaschi 1999, Carneiro 2011). Sedorko *et al.* (2017) observaram a existência rara de rastros fósseis nessa unidade e que o icnogênero *Palaeophycus* é o mais comum, e ainda mais incomuns os icnogêneros *Rusophycus*, *Skolithus* e *Cylyndrichnus*.

Ocorrem conflitos de interpretação do paleoambiente sedimentar da parte basal da Formação Furnas entre os autores que reconhecem a subdivisão da formação em unidades. Assine (1996) interpreta essa porção como depósitos de canais largos e de planícies aluviais costeiras. Bergamaschi (1999) e Bergamaschi e Pereira (2001) interpretam a última unidade como uma região intermediária entre um sistema marinho-costeiro e um sistema fluvial, uma região em que a maior parte da energia do sistema seria derivada de ondas e de marés. Lobato & Borgui (2005) e Carneiro (2011) interpretam que os depósitos da primeira unidade tenham sido depositados em uma praia cascalhos.

A segunda unidade tem cerca de 120 metros de espessura. A composição granulométrica varia de arenito fino a grosso, alguns seixos e grânulos podem ser observados na matriz, mas são incomuns. A composição mineralógica é formada principalmente por quartzo e subordinadamente por feldspato e caulinita, os grãos são subangulosos a subarredondados e não esféricos. Os depósitos são dispostos em camadas tabulares a cuneiformes, suas espessuras variam de 0,5 a 2,0 metros, parte dessas camadas migram lateralmente e verticalmente para pequenos estratos de siltito (decimétricos), mostrando ciclos de granodecrescência ascendente internos. Em escala de maior magnitude o padrão de granodecrescência ascendente só é observado na primeira metade dessa unidade, enquanto que na segunda metade o empilhamento se torna granocrescente ascendente (Assine, 1996, 1999; Bergamaschi, 1999).

As estruturas mais comuns são estratificações cruzadas acanaladas e estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe, outras estruturas sedimentares são encontradas com menor frequência como depósitos do tipo *neap-spring*, *mud-drapes* e *ripples*. O caráter de paleocorrentes dessa unidade é levemente bimodal com as paleocorrentes apontando mais frequentemente para NW e menos frequentemente para SE. Esta é a unidade da Formação Furnas mais rica em registros icnológicos, característica que é relacionada ao teor relativamente mais alto em argila e por ter maior influência marinha, entre os espécimes e icnogêneros estudados estão o *Palaephycus tubulares*, *Didymaulichnus lyelli*, *Thalassinoides*, *Cruziana acacensis elongata*, *Didymaulyponomos rowei*, *Heimdallia chatwini*, *Lockeia siliquaria*, *Psammichnites implexus*, *Rhizocorallium commune*, *Rusophycus acacensis*, e *Arthropycus brongniartii*, sendo todos esses presentes na icnotaxa *Cruziana* e

*Arenicolites*, *Skolithos*, *Cylindrichnus* e *Diplocraterion*. Seu contato com a terceira unidade é abrupto e erosivo (Ciguel 1989, Borgui 1993, Assine 1996, Bergamaschi 1999, Sedorko *et al.* 2017).

Lobato & Borgui (2005) e Carneiro (2011) a definem o ambiente sedimentar como deltaico-estuarino, transgressivo, influenciado pela ação das marés. Assine (1996) já define como ambiente marinho de *shoreface* dominado por maré. Bergamaschi (1999) e Bergamaschi & Pereira (2001) definem como um ambiente transicional-estuarino.

A terceira unidade tem cerca de 100 metros de espessura. Sua composição granulométrica varia de arenito médio a muito grosso, seixos e grânulos que ocorrem são observados na matriz, e a composição mineralógica é quartzosa, os grãos são subangulosos a subarredondados e não esféricos. Os depósitos estão dispostos em camadas tabulares com espessuras variando de 0,5 até 5,0 metros de espessura. Parte das camadas migram lateralmente e verticalmente para pequenos estratos de lamito, e *lags* ortoconglomeráticos decimétricos com centenas de metros de extensão lateral são observados por toda a unidade. A unidade apresenta um padrão de deposição retrogradante que culmina nas camadas de transição entre a Formação Furnas e a Formação Ponta Grossa, contudo em algumas porções da bacia, esse contato é erosivo (Assine 1996, 1999 Bergamaschi 1999).

As estruturas mais comuns são estratificações cruzadas acanaladas, tabulares, outras estruturas sedimentares são observadas subordinadamente como estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe, *mud-drapes*, *ripples*, e depósitos do tipo *neap-spring*. O caráter das estruturas sedimentares dessa unidade é polimodal. É a única unidade apresenta fósseis, porém ainda escassos, sendo eles palinomorfos e restos de *psylophytales*, *cooksonia*, *Horneophyton*, *Zosterophyllum*. Também apresenta icnofósseis do icnogêneros *Palaephycus*, *Thalassinoides*, *Rhizocorallium commune*, *Didymaulichnus lyelli*, *Skolithos*, *Arenicolites* e *Cylindrichnus* e *Diplocraterion* (Assine 1996, 1999, Bergamaschi 1999, Bergamaschi & Pereira 2001, Sedorko *et al.* 2017).

A terceira unidade é considerada a mais complexa da Formação Furnas, já que apresenta padrão de paleocorrentes polimodal, maior variedade e complexidade faciológica, relativa riqueza em icnofósseis e de fósseis entre seus estratos. A região

de contato desta unidade com a Formação Ponta Grossa já foi discutida por vários autores, desta forma a interpretação do ambiente sedimentar para essa unidade é bastante difusa. Dino & Rodrigues (1995) interpretam a unidade como de ambientes continentais a transicionais. Assine (1996) já a interpreta como depósitos de *shoreface* superior. Bergamaschi (1999) e Bergamaschi & Pereira (2001) a interpretam como um ambiente deltaico-lagunar. Carneiro (2011) considera como ambiente marinho raso dominado por maré.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E TRABALHO GEOLÓGICO CAMPO.

As primeiras etapas desta monografia foram a revisão bibliográfica e o reconhecimento geológico de campo para a seleção das áreas a serem estudadas mais detalhadamente. No total foram escolhidos dois afloramentos chaves que instigavam a discussão do paleoambiente (fluvial x marinho raso) a partir da caracterização das formas de leito do tipo barras. A escolha desses afloramentos foi baseada principalmente a partir das feições observadas em campo, e posterior confirmadas pela qualidade das linhas de GPR obtidas em cada localidade. Essas etapas foram fundamentais para toda a base estrutural desta pesquisa. Sem a revisão bibliográfica não haveria entendimento suficiente para a observação crítica de campo, bem como da coleta de dados com o intuito de responder uma problematização prévia. E sem o reconhecimento de campo inicial não haveria como estabelecer os alvos para iniciar a pesquisa mais direcionada aos objetivos propostos. Posteriormente foram realizadas mais 3 campanhas de campo para coletas de dados sedimentológicos, e 1 campanha destinada para a aquisição dos dados com o GPR.

As principais bibliografias abordadas nessa pesquisa foram utilizadas para três motivos principais: i) um referencial teórico metodológico; ii) uma base para a contextualização geológica sobre a Bacia Sedimentar do Paraná; iii) entendimento sobre a Formação Furnas. Para o referencial teórico abordado nesta pesquisa os materiais foram: Walker & James (1992); Miall (1999); Annan (2002); Neal (2004); Seilacher (2007); Silva *et al.* (2008); Nichols (2009); James & Dalrymple (2010); Boggs (2014). Para a contextualização geológica da Bacia Sedimentar do Paraná foram usados os trabalhos de Schneider *et al.* (1974), Fúlfaro *et al.* (1982), Zalán *et al.* (1987b), Milani (1997), Milani *et al.* (2007a); Pereira *et al.* (2012). Para o entendimento sobre a Formação Furnas foram usados os como os de Zalán (1987a), Ciguel (1989),

Pereira *et al.* (1992), Assine (1996), Bergamaschi (1999), Bergamaschi & Pereira (2001), Borgui & Lobato (2005), Carneiro (2011), Zabbini *et al.* (2012) e Sedorko *et al.* (2017).

Por se tratar de uma área de estudo próxima à Curitiba/PR, o reconhecimento e a coleta de dados sedimentológicos e de georradar nos campos foram sendo executados desde o início da pesquisa, contudo, foram interrompidos durante o período de quarentena da Covid-19. Apesar dessa paralisação dos campos, foi possível dar continuidade e desenvolver a pesquisa sem maiores perdas. As viagens de campo começavam a partir do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no Município de Curitiba, até a região de estudo (Serra de São Luiz do Purunã, entre os municípios de Balsa Nova e Campo Largo). Os materiais utilizados nessas etapas foram: GPS de campo e-Trex 30 Portátil – Garmin®, Bússola do tipo Bruntom declinada a  $-19^{\circ}$ , martelo geológico, marreta, talhadeira, lupa de bolso com aumento de 10x, trena e câmera fotográfica. Os dados coletados em campo foram basicamente a descrição dos afloramentos considerando as fácies sedimentares, geometria das camadas, relação de contatos, coleta de dados de paleocorrentes, conteúdo incológico e o empilhamento da sucessão a partir de perfis sedimentares verticais.

### 3.2. ANÁLISE FACIOLÓGICA

A análise de fácies sedimentares foi dividida em duas etapas. A primeira correspondeu ao trabalho de campo, em que os dados foram coletados considerando descrições de texturas e estruturas das rochas observadas, além do levantamento de perfis verticais de empilhamento da sucessão. A segunda etapa foi realizada por meio de trabalhos pós-campo, analisando as descrições de campo e digitalizando colunas estratigráficas em escritórios, com intuito de discernir associações entre as feições descritas na caderneta, com o emprego de fotos de maneira a aumentar a qualidade dessa etapa do trabalho.

As litofácies e as biofácies foram organizadas em uma tabela de maneira semelhante à de Miall (1977), ampliada por Miall (1978). Ela consiste em 4 colunas, a primeira sendo o código da fácies, a segunda seu respectivo nome, a terceira a descrição de feições existentes e a quarta a interpretação sobre seu processo de formação. Programas de manipulação de imagens vetoriais como o Inkscape®, foram usados para a elaboração de imagens interpretadas, bem como da digitalização dos

perfis de cada afloramento. Após interpretar os processos de formação de cada fácies sedimentar, estas foram agrupadas em associação para a interpretação dos possíveis sistemas deposicionais.

### 3.3. PALEOCORRENTES

O estudo de paleocorrentes fornece informações sobre quatro parâmetros a serem analisados em depósitos sedimentares: i) o mergulho deposicional, local ou regional, refletindo os padrões de subsidência da bacia; ii) o sentido do suprimento sedimentar; iii) a geometria e a orientação das unidades litológicas; iv) o ambiente sedimentar. É considerada uma técnica poderosa quando aplicada em conjunto com uma análise de fácies robusta (Miall 1999).

As paleocorrentes retiradas em campo foram processadas em softwares específicos (e.g. GeoTec Stereo®) para a elaboração de diagramas de rosetas e então observar a direção do paleofluxo. O que foi principalmente analisado foi o padrão de direção das estruturas sedimentares, se é unimodal, bimodal ou polimodal.

### 3.4. RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR)

Nos levantamentos geofísicos, foram realizados 13 perfis eletromagnéticos utilizando o GPR (*Ground Penetrating Radar*), contudo foram selecionadas apenas as linhas que foram realizadas nos dois afloramentos chaves. O objetivo desta etapa foi verificar as respostas dos depósitos da Formação Furnas para esse método e discriminar as radarfácies para observar as feições das rochas em subsuperfície. Tentar delimitar as geometrias dos corpos sedimentares, e caracterizar as feições internas dos mesmos, para posterior análise em conjunto com os dados dos afloramentos.

O equipamento para a realização dessa etapa do trabalho foi um GPR da marca GSSI, modelo SIR-3000, com uma antena de 400 Mhz, uma taxa de 120 *scans/samples*, *sample size* de 16-bit, número de 512 *samples/scan* e uma janela temporal de 80 ns. O equipamento foi emprestado pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e a aquisição em campo foi auxiliada pelo LPGA (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada) da UFPR.

O *software* usado foi o *Reflex-Win 8.3 Themes*, da *Sandmeyer Geophysical Research* ©, tendo licença provida pela Universidade Federal do Ceará em parceria com o LPGA/UFPR. Os dados foram processados por meio de 7 filtros. O primeiro

filtro foi *Static Correction*, também chamado como filtro de tempo zero, usado para corrigir os sinais de ondas aéreas (*airwave*) e de *groundwave*. O segundo e o terceiro filtro foram o *Remove Header Gain* e o *Automatic Gain Control Gain (AGC-Gain)*, utilizados para equalizar todas as ondas refletidas mostradas no radargrama, independente da profundidade. Então foi aplicado o *Background Removal* para remover o ruído gerado pelo próprio sistema do GPR e por fim foi usado um filtro chamado *Bandpass Frequency*, utilizado para retirar todos os ruídos que não se encontram dentro da faixa de frequência de interesse. Após esta etapa, a ferramenta *Fk-spectrum* foi utilizada para, se possível, retirar todo o ruído que não se encontra na área de interesse do trabalho através de um espectro de onda gerado pelo próprio programa. Para finalizar é usada uma migração de tempo simples, chamada de *Diffraction Stack*, um dos passos mais importantes durante a filtragem já que faz correção do *lag* de tempo zero, aproximando refletores mostrado para a realidade das superfícies que os geraram (Leandro *et al.* 2019).

Para a determinação das radarfácies e da modelagem em 2D das superfícies refletoras foi usado o modelo elaborado por Neal (2004) com respeito a sua geometria, continuidade, amplitude e frequência. O padrão de terminação, bem como a relação entre os refletores, foi usado para associar com fácies sedimentares reconhecidas em campo e então interpretar geologicamente seção. Programas de manipulação de imagens vetoriais como Inkscape (®) foram também utilizados para gerar as imagens com as linhas interpretadas. Os dados foram organizados em uma tabela de descrição de radarfácies seguindo a mesma lógica da tabela de fácies sedimentares e foi de acordo com os trabalhos de Neal (2004), com base em modelos já existentes (Figura 10).

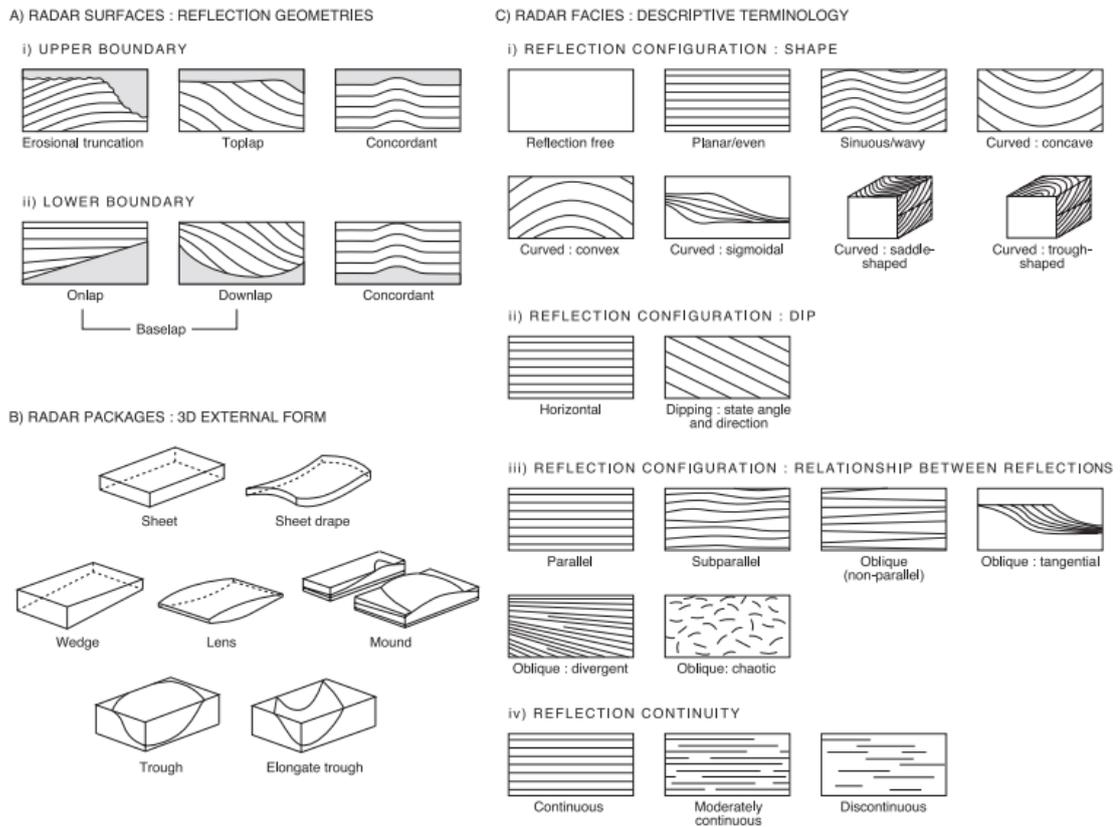


Figura 10 – Modelo para descrição e definição de radarfácies – Modificado de Campbell (1967), Mitchum *et al.* (1977), Allen (1982) por Neal (2004).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. ANÁLISE SEDIMENTOLÓGICA

Neste trabalho foram analisadas e descritas 8 litofácies a partir de dados de duas localidades. Sendo elas: Arenito médio a muito grosso maciço (Sm), arenito médio a muito grosso com estratificação cruzada acanalada (St), arenito médio a grosso com icnofóssil *Thalassinoides* (Sit), arenito médio a grosso com estratificação cruzada do tipo espinha de peixe (Sh), paraconglomerado com deformações internas (Gd), paraconglomerado com estratificação cruzada acanalada (Gt), lags conglomeráticos (Gl) e lamito com estruturas de carga (Ld). A tabela 1 apresenta um resumo destas fácies, de maneira similar ao código de fácies apresentado por Miall (1977, 1978).

Tabela 1 – Resumo das fácies observadas.

Código	Litofácies	Estruturas	Interpretação
Ld	Lamito	Estruturas de Carga e chama	Decantação de plumas de sedimentos em suspensão. Deformações por sobrecarga proveniente de sedimentos rúnicos depositados em um substrato empapado em água.
Sm	Arenito médio a grosso	Maciça	Fluxos hiperconcentrados a concentrados e /ou estruturas sedimentares obliteradas por fluidização.
St	Arenitos médio a grosso	Estratificação cruzada acanalada e tangencia com superfícies de reativação truncando sets de estratificação I.	Migração de formas de leitos tridimensionais (dunas sinuosas) através de correntes trativas unidirecionais
Sit	Arenito médio a grosso	Iconofóssel <i>Thalassinoides</i>	Escavações tubulares ramificadas em forma de Y e hexagonais relacionadas a atividades de moradia de crustáceos (provavelmente decápodes)
Sh	Arenito médio a grosso	Estratificação cruzada do tipo espinha de peixe.	Formas de leito originadas pela migração de dunas subaquosas por correntes trativas bidirecionais
Gd	Paraconglomerado	Estratificação cruzada obliterada por deformação sinsedimentar.	Migração de forma de leito por fluxo trativo unidirecional. Deformação causada pelo peso e rápida deposição em um substrato empapado em água
Gt	Paraconglomerado	Estratificação cruzada acanalada e tangencial com superfícies de reativação truncando sets de estratificação.	Migração de formas de leitos tridimensionais (dunas sinuosas) através de correntes trativas unidirecionais em regimes intermitentes.
GI	Conglomerado (orto ou para)	Lags conglomeráticos	Depósitos residuais de formas de leito canalizadas com <i>bypass</i> de sedimentos de granulometria mais fina.

Os dois afloramentos estudados (figura 2) foram batizados de acordo com as propriedades das quais eles estão localizados. O ponto 1 está situado na Fazenda São José, município de Campo Largo, PR, enquanto o ponto 2 está localizado na

Fazenda Thalia, município de Balsa Nova, PR. Não foi possível confirmar a relação estratigráfica entre os pontos pela falta de continuidade lateral entre os afloramentos, no entanto o empilhamento estratigráfico não foi o foco deste estudo. A seguir as fácies observadas e analisadas são explicadas em maior detalhe.

#### 4.1.1. Arenitos

A fácies Sm foi observada nos dois afloramentos trabalhados. Essa fácies é descrita como arenito de granulometria média a grossa, com raros grãos de tamanho seixo, e composição predominante de quartzo e subordinadamente caulinita. Os clastos possuem baixa esfericidade e são subarredondados na sua maioria. Não há estruturas sedimentares definidas ou bem demarcadas (figuras 10A e 10B). A fácies Sm é interpretada como proveniente de fluxos hiperconcentrados a concentrados de rápida deposição. Nesse fluxo de alta energia, a concentração de sedimentos e a rápida deposição pode inibir a formação de estruturas sedimentares trativas (Tucker 2003). Caso a concentração do fluxo permita a geração destas estruturas, estas podem estar obliteradas por processos de fluidização sin-deposicional.

A fácies de arenito St é de longe a mais abundante em ambos os afloramentos analisados (figuras 10C e 10D). Ela composta por arenito de granulometria média a grossa, de composição quartzosa, com seixos e grânulos sendo subordinadamente observados. Os grãos são subarredondados e apresentam esfericidade média, as estruturas sedimentares observadas são do tipo estratificação cruzada acanalada ou tangencial, podendo apresentar superfícies de reativação truncando *sets* de estratificação cruzada. Essas estratificações foram classificadas a partir de seu ângulo, de 5° a 15° foram classificadas como de baixo ângulo, de 15° a 30° foram classificadas como de alto ângulo. A formação dessas estratificações é atrelada a leitos tridimensionais formados por correntes trativas que depositariam os sedimentos seguindo a direção de seu fluxo, formando dunas subaquosas de crista sinuosa (Tucker 2003).

A fácies Sh foi somente observada no afloramento da Fazenda Thalia (Ponto 2). É descrita como arenito médio a grosso, com raros seixos observados ao longo da matriz. Os grãos possuem esfericidade baixa e são subarredondados. A composição é predominante quartzo com subordinadas caulinitas. As estruturas sedimentares observadas (figuras 10E e 10F) são do tipo estratificação cruzada tabular ou acanalada que alternam o mergulho dos *foresets* em direções opostas em uma mesma camada. O mergulho da estratificação varia entre 10° e 15°. Para a formação

dessas estruturas, é necessário um processo de sedimentação a partir de um fluxo bidirecional (Tucker 2003).

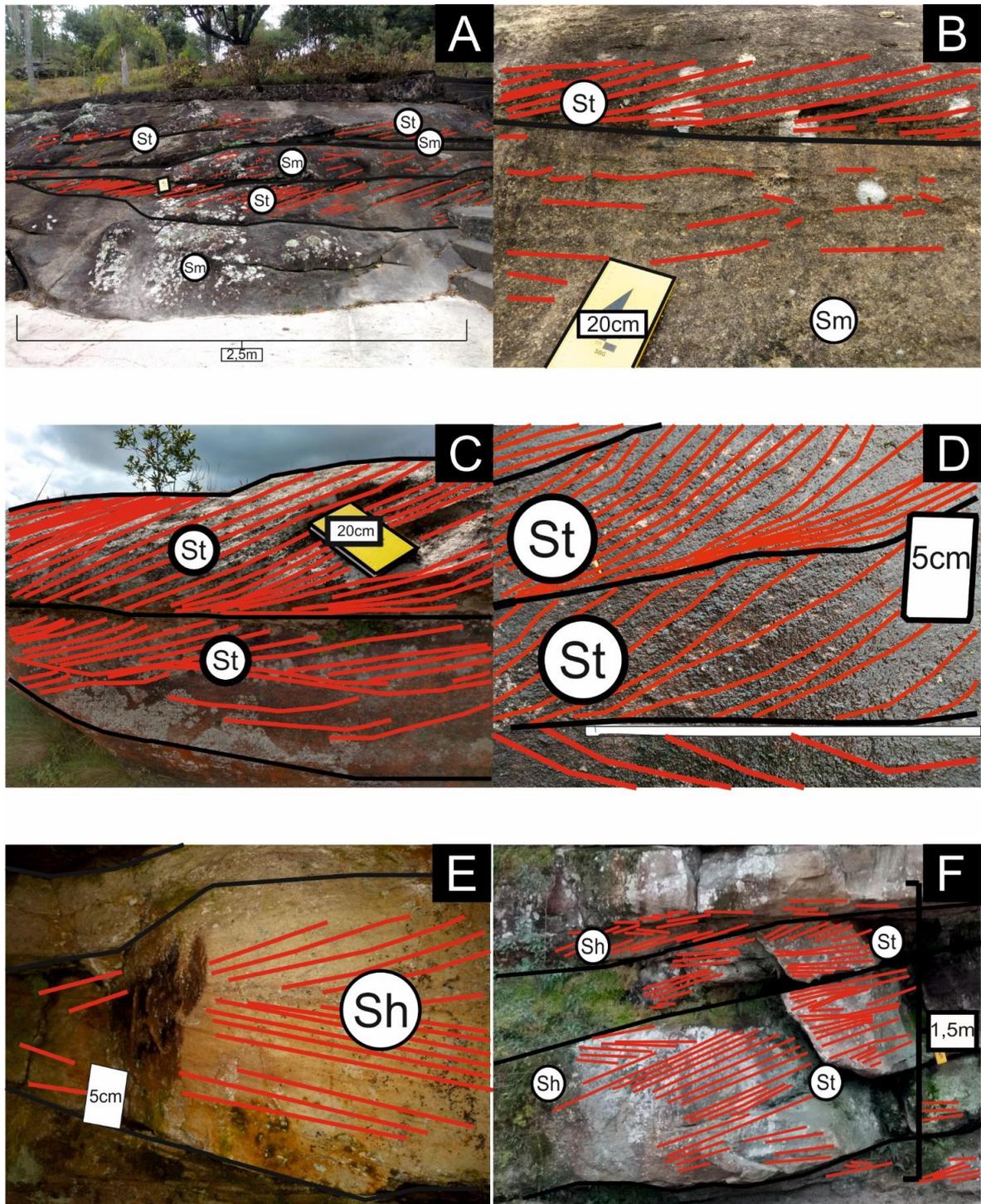


Figura 11 - Fácies sedimentares psefíticas observadas em campo: a) Afloramento da Fazenda Thalia em que são observadas as fácies Sm e St; b) Afloramento da Fazenda São José em que podem ser observadas as fácies St e Sm; c) Afloramento na Fazenda São José com a fácies St com estruturas em médio porte; d) Detalhe no afloramento da Fazenda São José apresentando a fácies St de pequeno porte ; e) Detalhe em afloramento da Fazenda Thalia com fácies Sh; f) Afloramento da fazenda Thalia em que são observadas as fácies St e Sh com estruturas de porte médio. Em vermelho são representadas as estratificações cruzadas. Em preto são apresentadas as geometrias dos depósitos.

A fácies Sit foi descrita apenas no afloramento da Fazenda Thalia. É composta por arenito de granulação média a grossa, composição quartzosa, com grãos subarredondados e com esfericidade baixa a moderada. No topo, foi observada a presença de icnofósseis relacionados ao icnogênero *Thalassinoides* (Figura 11A). Este icnofóssel trata-se de uma escavação tubular ramificada em forma de Y e/ou hexagonal relacionada à atividade de moradia permanente de crustáceos (provavelmente do tipo decápodes). A presença desse icnofóssel nós permite inserir a fácies Sti em um ambiente costeiro a marinho raso. A preservação no topo da litofácies pode indicar períodos de mais baixa energia o que possibilitou a preservação dos traços (Yanin & Baraboshkin 2013).

#### 4.1.2. Lamitos

A fácies Ld é a única fácies de granulometria fina descrita e ocorre de maneira bastante restrita. Nesta fácies pelítica são observadas estruturas de deformação do tipo carga e chama (figuras 11B e 11C). A deformação observada foi interpretada como sendo derivada da carga exercida pelos sedimentos sobrepostos, de granulometria mais grossa. Os depósitos de lamitos ainda continham uma alta concentração de água o que proporcionou um comportamento plástico acarretando na deformação pós-deposicional (Tucker 2003). Os depósitos da fácies Ld foram observados apenas no afloramento da Fazenda Thalia.

#### 4.1.3. Conglomerados

A fácies Gd foi somente observada no afloramento da Fazenda Thalia, trata-se de paraconglomerado composto por seixos dispostos em uma matriz arenosa. Seus clastos são formados por grãos de quartzo esféricos e subarredondados, tanto no arcabouço como na matriz. As estruturas sedimentares observadas são estratificações cruzadas obliteradas por feições de deformação (Figura 11C). A estratificação cruzada muitas vezes é marcada pelo alinhamento dos clastos nos *foreset*. A litofácies Gd é atribuída a migração de formas de leito cascalhosas por correntes trativas unidirecionais. As deformações observadas são do tipo sinsedimentar devido a deformação plástica da camada sotoposta devido a carga exercida pela rápida deposição da fácies Gd. A ascensão das porções deformadas da camada plástica acaba perturbando as estruturas sedimentares primárias da fácies Gd.

A fácies Gt foi somente observada no afloramento da Fazenda São José, e trata-se de paraconglomerado formado por seixos e grânulos mergulhados em uma matriz arenosa média a grossa. Os clastos são de composição quartzosa, são subarredondados e possui esfericidade moderada a alta. As estruturas sedimentares observadas (figuras 11D e 11E são estratificações cruzadas acanaladas ou tangenciais de médio porte (decimétricas). Essas estratificações foram classificadas a partir de seu ângulo, de 5° a 15° foram classificadas como de baixo ângulo, de 15° a 30° foram classificadas como de alto ângulo. Geralmente, essa fácies grada para a fácies St, já que seus estratos passam de porções conglomeráticas na base e para porções mais arenosas no topo. A origem das estratificações acanaladas é atrelada a migração de leitos tridimensionais formados por correntes trativas unidirecionais originando dunas de crista sinuosas (Tucker 2003).

A fácies G1 é composta por lentes centimétricas a decimétricas de *lags* cascalhosos e sua ocorrência é restrita ao afloramento da Fazenda São José (Figura 11F). Essa fácies é composta principalmente por seixos e grânulos de quartzo, subarredondados, apresentando moderada a alta esfericidade. *Lags* conglomeráticos são atribuídos a depósitos residuais que se depositam principalmente na base de feições canalizadas devido à perda de competência do fluxo para transportar sedimentos mais grosseiros. No entanto, esse fluxo ainda apresenta competência suficiente para transpassar os sedimentos mais finos para outras porções do sistema deposicional (Stevenson *et al.* 2015).

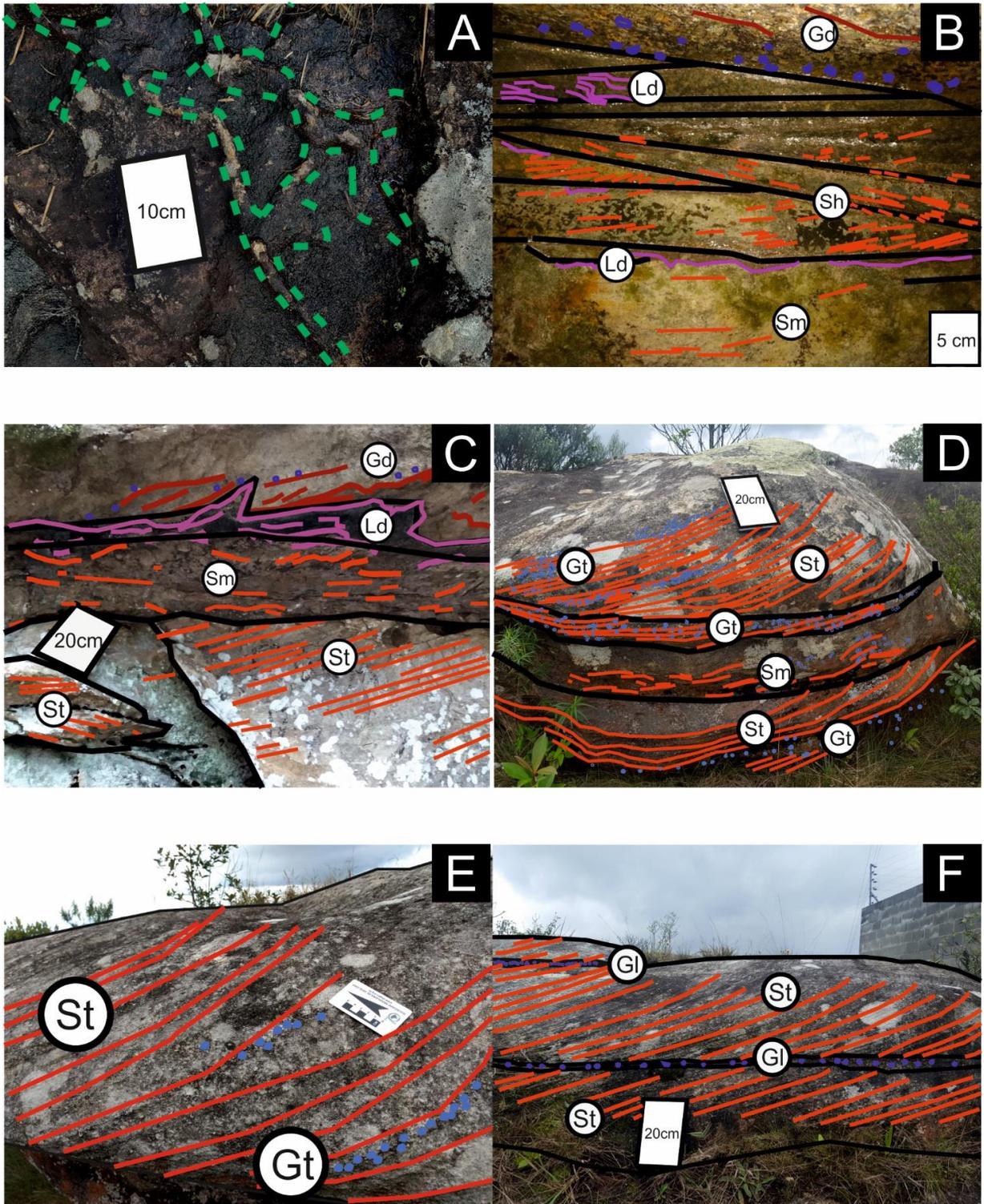
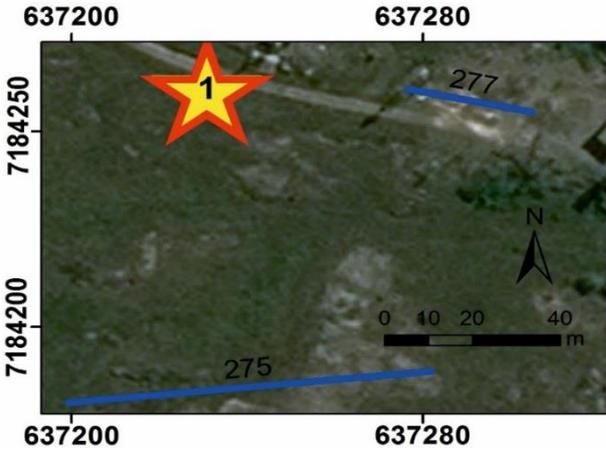


Figura 12 - Fácies sedimentares observadas em campo: a) Litofácies Sit com o icnofóssil *Thalassinoides*; b) Afloramento da Fazenda Thalia onde podem ser observadas as litofácies Ld, Gd, Sh e Sm; c) Afloramento na Fazenda Thalia com as litofácies Gd, Ld, Sm e St; d) Afloramento da Fazenda São José apresentando as litofácies Gt e St; e) Detalhe em afloramento da Fazenda São José com as litofácies St e Gt; f) Afloramento da fazenda São José em que são observadas as litofácies St e Gl. Em vermelho claro são representadas as estratificações cruzada, em azul são representados os clastos seixosos indicando regiões ortoconglomeráticas, em vermelho escuro são apresentadas estruturas de deformação interna nos depósitos rudáceos, em roxo são apresentadas estruturas desorganizadas nos lamitos e estruturas em chamas. Em verde claro e tracejado está representado os icnofósseis do icnogênero *Thalassinoides*.

#### 4.2. ANÁLISE EM GPR

Foram feitas 13 linhas de GPR ao longo do trabalho das quais 4 foram selecionadas para este estudo. Na tabela 2 está a relação entre as duas localidades trabalhadas e seus respectivos perfis 2D obtidos em campo e tratados posteriormente em laboratório. Na figura 13 são apresentadas estas 4 radargramas.

Tabela 2 - Linhas de GPR de acordo com suas localidades.

Afloramento	Localização	Linha de GPR
Fazenda São José		Linha 275 Linha 277
Fazenda Thalia		Linha 281 Linha 282

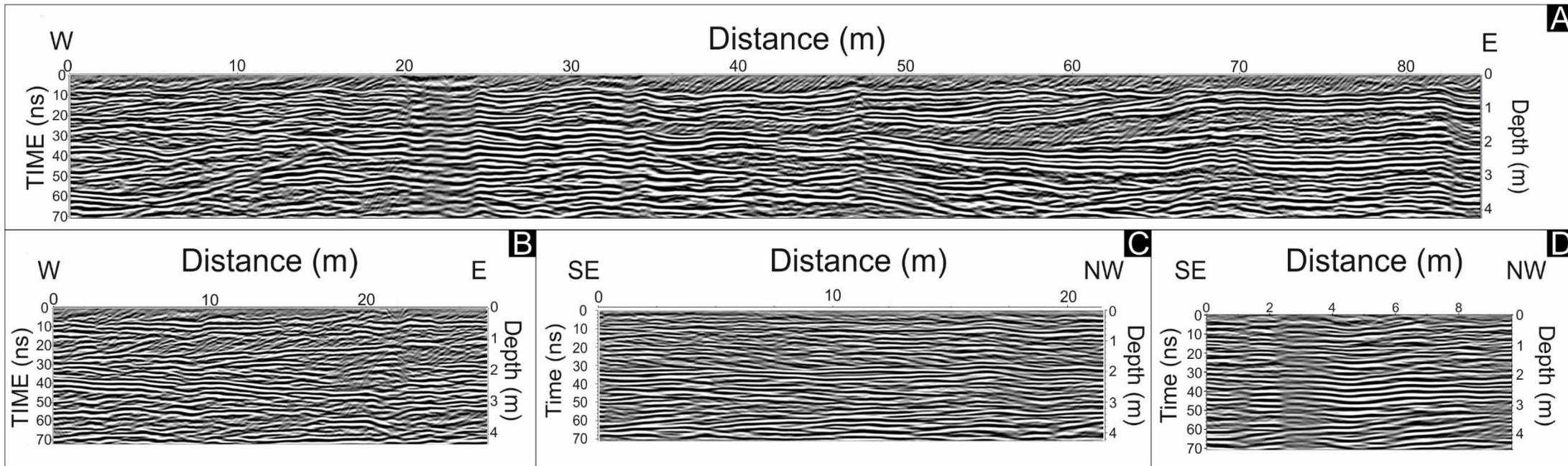


Figura 12 – Linhas de GPR processadas neste trabalho. A) Linha de GPR 275, Fazenda São José, Campo Largo, PR. B) Linha de GPR 277, Fazenda São José, Campo Largo, PR. C) Linha de GPR 281, Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. D) Linha de GPR 282, Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR.

As radarfácies Rf1, Rf2, Rf3 e Rf4 foram identificadas a partir da correlação entre os dados obtidos de um afloramento da Fazenda Thalia e da linha de GPR 282 traçada no mesmo local (Figura 13). Já a radarfácies Rf5 foi identificada a partir da associação dos dados do afloramento da Fazenda São José e da linha de GPR 277 (figuras 14 e 15).

As 5 radarfácies foram separadas entre si usando a metodologia apresentada por Neal (2004) a partir da terminologia descritiva das reflexões (Figura 10) observadas nos perfis 2D, essas relações são: O formato, o mergulho, a relação entre suas reflexões e continuidade entre reflexões.

Na tabela 3 são sumarizadas as 5 radarfácies distinguidas a partir da análise dos perfis de georradar, nesta tabela são apresentadas as descrições e suas consequentes interpretações.

Tabela 3 – Radarfácies com suas respectivas descrições e interpretações

Radarfácies	Descrição	Interpretação
Rf1	Reflexões descontínuas, desordenadas e desalinhadas, com mergulho variável. Formato sinuoso.	Depósitos sedimentares arenosos e conglomeráticos maciços e com estratificação cruzada de baixo ângulo
Rf2	Reflexões contínuas, subparalelas, horizontais, tabulares.	Resolução menor do equipamento é menor do que as estruturas presentes nos depósitos.
Rf3	Reflexões moderadamente contínuas, subparalelas. Sem mergulho e sinuosas.	Depósitos sedimentares arenosos e conglomeráticos com estratificação cruzada de baixo ângulo
Rf4	Reflexões moderadamente contínuas, tangenciais, tendo mergulho de 5° a 15°. Formato sinuoso.	Depósitos sedimentares arenosos e conglomeráticos maciços e com estratificação cruzada de alto e baixo ângulo
Rf5	Reflexões descontínuas, Tangenciais, com mergulho variando de 15° a 25°, formato planar.	Depósitos sedimentares arenosos compreendidos apenas por estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo.

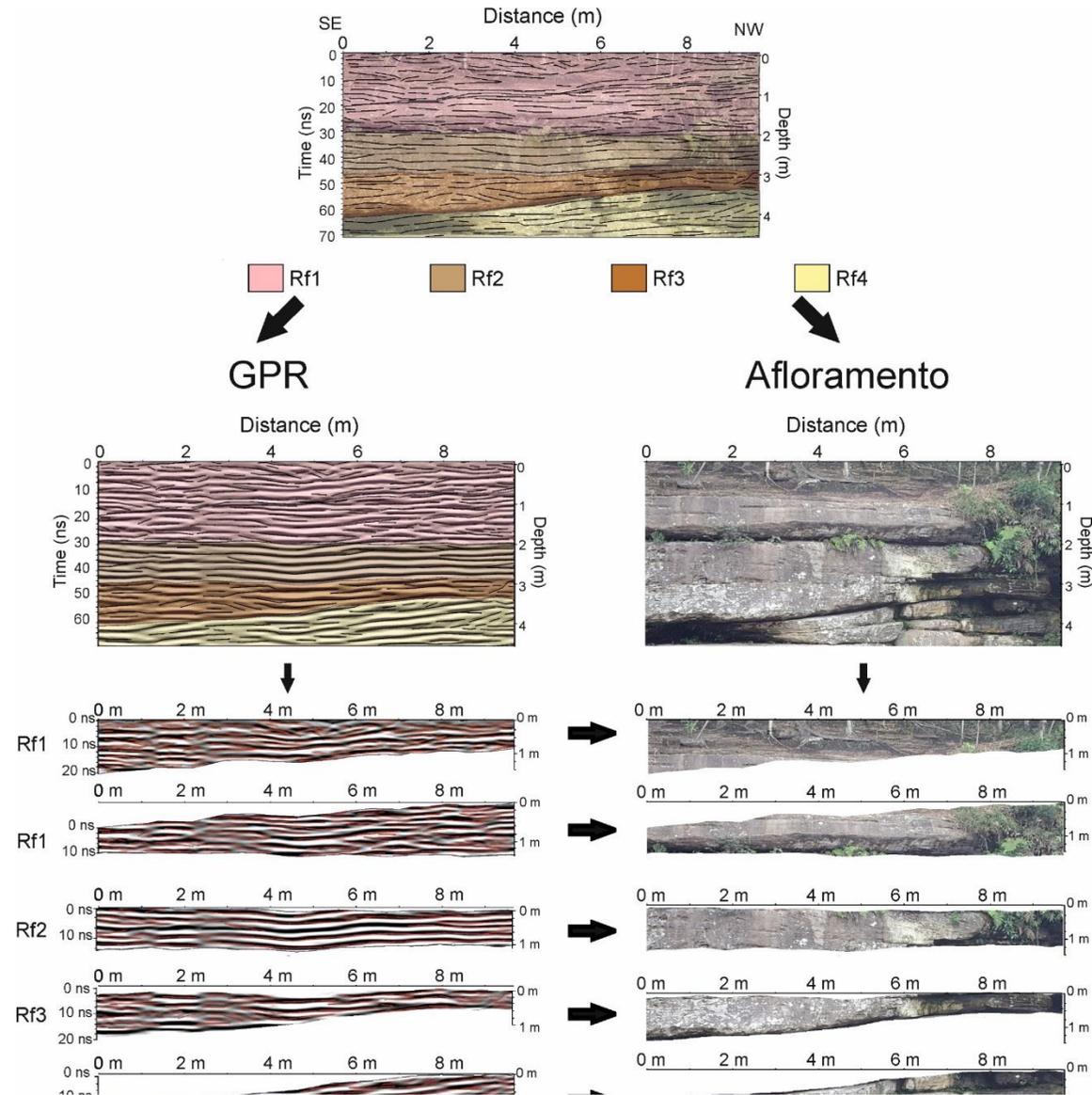


Figura 13 - Associação das radarfácies Rf1, Rf2, Rf3 e Rf4 que são observadas na linha 282 com o afloramento principal observado na Fazenda Thalia. O polígono rosa representa a Rf1, o marrom claro representa a Rf2, o marrom escuro representa a Rf3, e o branco representa a Rf4. Em preto e em vermelho estão representados os refletos observados na linha 282.

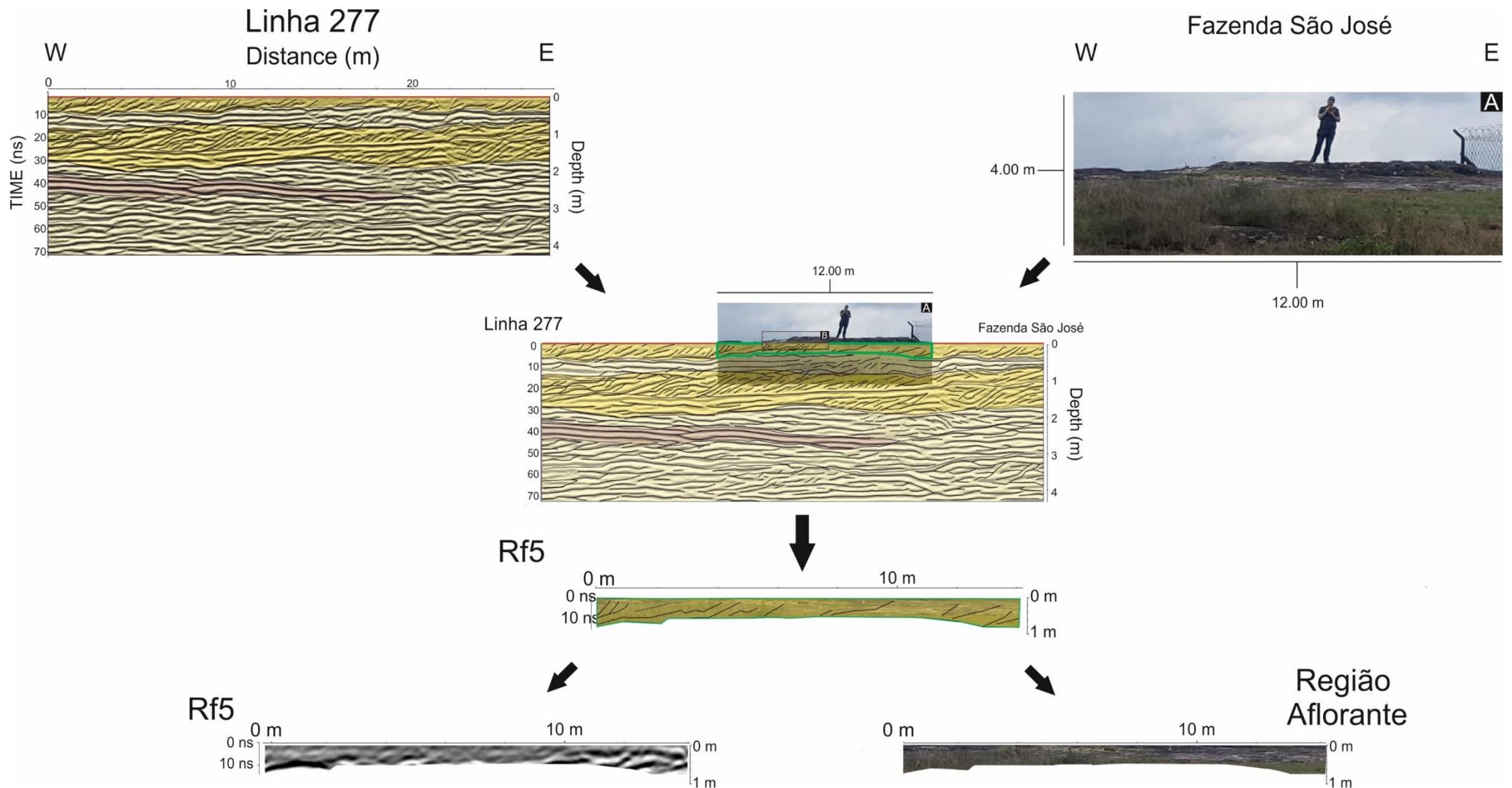


Figura 14 - Critérios para descrição e interpretação da radarfácies Rf5 a partir da linha 277 [Fazenda São José]. Na linha em verde claro é representada a região de intersecção do afloramento em superfície com a radarfácies Rf5 descrita. A linha preta, em meio aos polígonos, representa os refletores observados na linha 277. Entre os polígonos observados a Rf5 é representada pelos amarelos, enquanto a Rf4 é observada com cor branca, e a Rf2 com cor marrom claro. A) Região onde a Rf5 foi interpretada. B) Zoom para a região em que a radarfácies foi interpretada observada na Figura 14<sup>a</sup>.

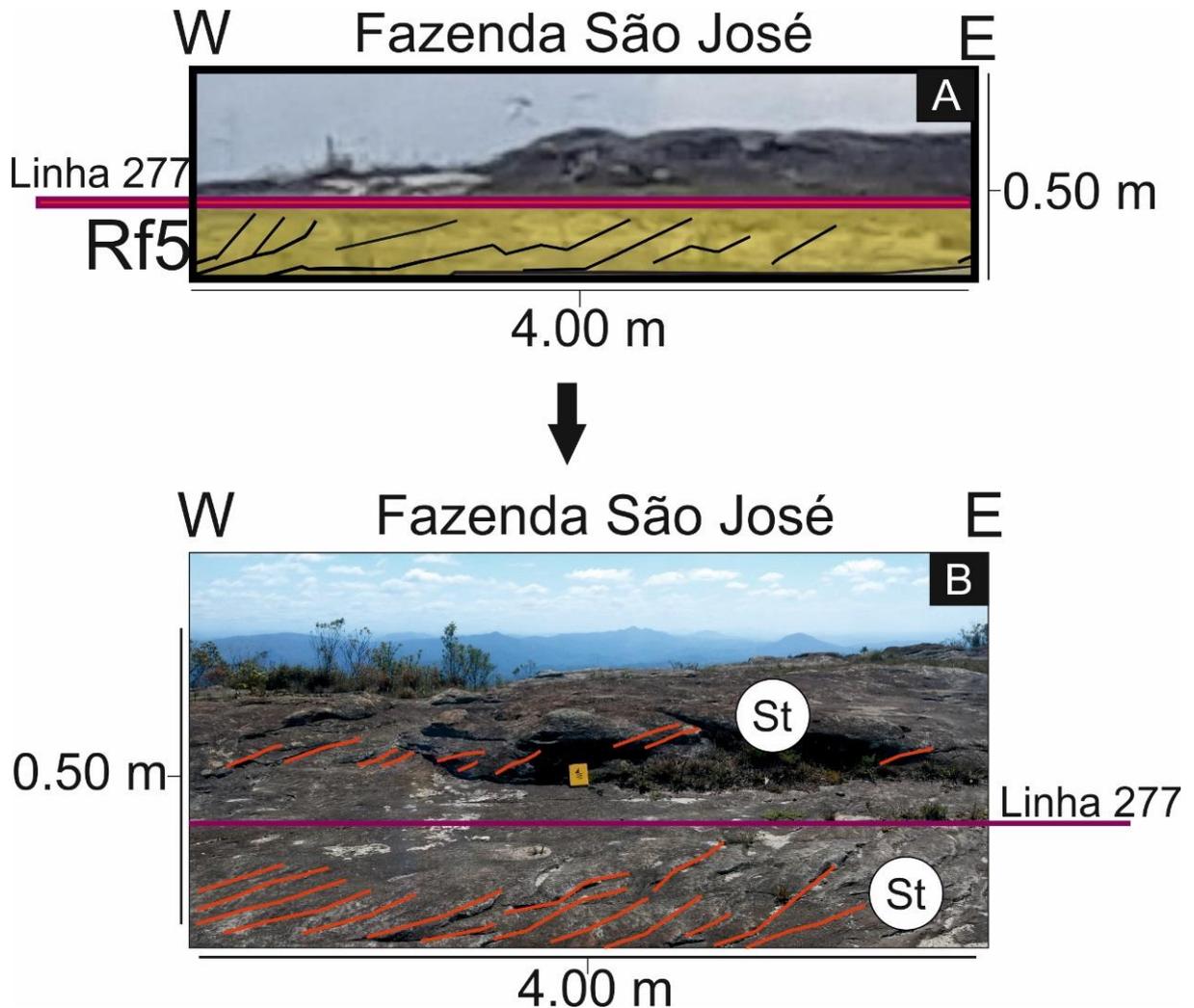


Figura 15 – Foco para a região em que a Rf5 foi descrita. a) Detalhe para a região onde a Rf5 foi interpretada. Os traços pretos e finos indicam refletos, O traço grosso e roxo representa onde a linha 277 foi adquirida, em amarelo está a radarfácies Rf5. b) Detalhe para a região onde a Rf5 foi interpretada em uma foto em maior resolução. O traço roxo e grosso representa onde a linha 277 foi traçada, os traços em vermelho representam as estruturas sedimentares associadas a Rf5, no caso são estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo.

A Rf1 foi proposta a partir das primeiras camadas do afloramento da Fazenda Thalia (Figura 13) em que a linha 282 foi passada. Ela é descrita como reflexões descontínuas e desordenadas, desalinhas e seu mergulho é variável. A geometria da radarfácies como um todo é sinuoso. A correlação dos dados de GPR com os dados retirados de campo permitem observar que essa radarfácies (Figura 16A) apresenta relação com depósitos maciços (Sm) e com presença estratificação cruzada acanalada (St e Gt) de baixo ângulo.

A Rf2 foi definida a partir da segunda camada do afloramento da Fazenda Thalia (Figura 13) em que a linha 282 foi passada. Esta radarfácies (Figura 16B) possui formato tabular e é composta por reflexões contínuas e subparalelas,

horizontais. Não houve correlação dos dados de GPR com os dados de afloramento, já que as camadas do afloramento apresentam depósitos de barra representados pelas fácies St e Gt, com estratificações de pequeno porte (centimétrica) de maneira que não houve contraste suficiente para observar qualquer feição com a resolução do GPR (400 Mhz).

A Rf3 foi descrita a partir da terceira camada do afloramento da Fazenda Thalia (Figura 13) em que a linha 282 foi passada. Esta radarfácies (Figura 16c) é compreendida por reflexões moderadamente contínuas, apresentam mergulho variável e sem direção específica, o formato da radarfácies é sinuoso. Essa radarfácies é formada essencialmente por depósitos compostos por estratificações cruzadas tangenciais de baixo ângulo (St).

A Rf4 foi proposta a partir da última camada do afloramento da Fazenda Thalia (Figura 13) em que a linha 282 foi passada. Esta radarfácies (Figura 16D) é formada por reflexões moderadamente contínuas, tangenciais com mergulho entre  $5^{\circ}$  e  $15^{\circ}$ , a radarfácies possui formato sinuoso. Foi interpretada como depósitos areníticos e paraconglomeráticos que formados principalmente por estratificação acanalada de baixo e alto ângulo (St e Sm).

A Rf5 foi identificada a partir das primeiras camadas do afloramento da Fazenda São José (Figura 14A, 14B, 15A e 15B) em que a linha 277 foi passada. Esta radarfácies (Figura 16E) tem geometria planar e é representada por reflexões descontínuas e tangenciais, apresentando mergulho variável entre  $15^{\circ}$  e  $25^{\circ}$ . Os depósitos atrelados a esta radarfácies são formados por paraconglomerados e arenitos grossos com estratificação cruzada acanalada (St e Gt) de alto ângulo.

A figura 16 apresenta o resumo das radarfácies interpretadas a partir dos afloramentos. Pode observar que na Figura 16a, observa-se que o depósito representado pela radarfácies RF1 apresenta poucas estruturas sedimentares relacionadas à estratificações cruzadas de baixo ângulo. Já na figura 16B, observa-se que na RF2 não há uma correspondência entre o radargrama e as estruturas sedimentares observadas em afloramento. Na figura 16C mostra que a Rf3 representa depósitos compostos por estruturas formadas principalmente por estratificações cruzadas de baixo ângulo. A figura 15d expõe que a Rf4 representa depósitos compostos por estratificações cruzadas acanaladas de baixo e alto ângulo. Enquanto

que a Figura 16E representa os depósitos que compõe a Rf5, formado apenas por estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo, esta figura é composta por duas imagens de um mesmo afloramento. Enquanto a imagem de cima representa a extensão lateral dos depósitos em superfície, a imagem abaixo exhibe este mesmo ponto em maior detalhe, expondo as estruturas em maior resolução

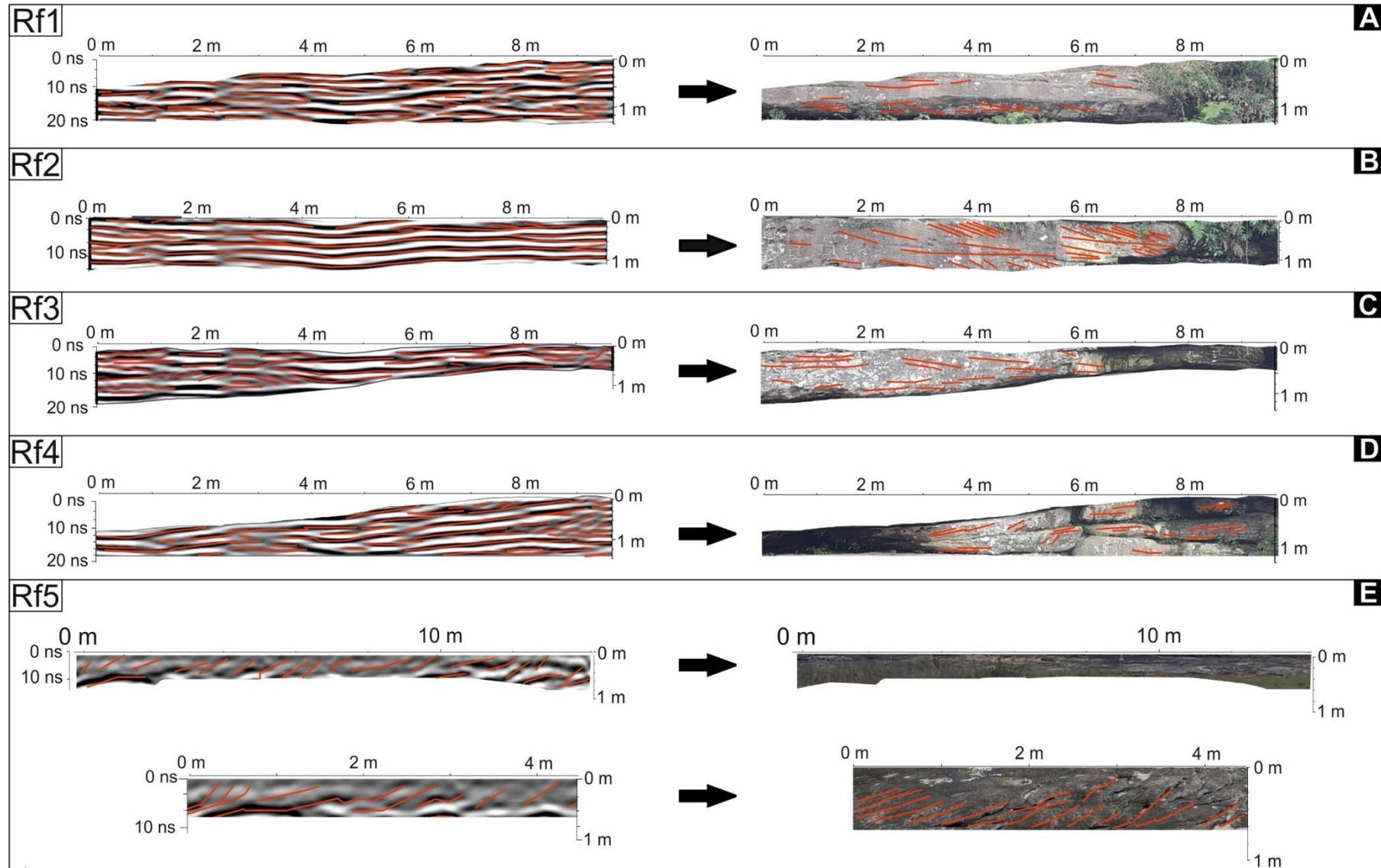


Figura 16– Sumário das radarfácies descritas. Nas imagens à esquerda são mostrados os radargramas representativos para cada radarfácies. Nas imagens à direita são apresentados os refletores que definem o padrão observado nas radarfácies em traços vermelhos, e também são mostrados seus respectivos radargramas. E através dos traços vermelhos nas imagens da direita, as estruturas sedimentares são representadas e correlacionadas à essas radarfácies: a) é mostrada a radarfácies Rf1 e as estruturas observadas são depósitos maciços ou com estratificação cruzada acanalada de baixo ângulo; b) é mostrada a Rf2 e como seus refletores não refletem as estruturas observadas em afloramento; c) apresenta a radarfácies Rf3 em que as estruturas observadas são majoritariamente estratificações cruzadas de baixo ângulo; d) representa a radarfácies Rf4 e as estruturas observadas são estratificações cruzadas acanaladas de baixo e alto ângulo; e) é mostrada a radarfácies Rf5 e as estruturas observadas são estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo.

## 5. DISCUSSÕES

### 5.1. PONTO 1 – FAZENDA SÃO JOSÉ

A localidade da Fazenda São José compreende majoritariamente rochas psefíticas e subordinadamente rochas psamíticas, não foram observadas rochas pelíticas. As rochas de granulometria areia apresentam assembleia mineral composta principalmente por quartzo e secundariamente por caulinita, o grau de maturidade foi considerado moderado. Sua granulação varia entre arenitos médios a muito grossos, tendo raramente grânulos e seixos dispersos, predominantemente seus clastos são subangulares e possuem esfericidade baixa a moderada, portanto o grau de seleção textural das rochas psefíticas foi considerado baixo a moderado. Já as rochas rudáceas são formadas por predominantemente paraconglomerado (20% de clastos por matriz) de matriz arenosa, e subordinadamente ortoconglomerado (<15% de matriz). Ambos os conglomerados são oligomíticos e compostos por quartzo, portanto sua maturidade mineralógica foi considerada muito alta. Já sua composição textural é formada por grânulos e seixos, os clastos são subarredondados e de esfericidade moderada, portanto seu grau de seleção foi considerado moderado.

As camadas apresentam geometria tabular com sua altura variando apenas entre 0,4 m e 0,5 m, com grande extensão horizontal, podendo chegar a até 50 metros de diâmetro (Figura 17). Foi verificado uma baixa variedade de litofácies, observando-se apenas as fácies Sm, St, Gt e Gl na sucessão sedimentar (Figura 18). A seção analisada apresenta uma relativa monotonia vertical já que as fácies se repetem a partir de um certo padrão. Esse padrão é representado por depósitos psamíticos em sua base (Gl e Gt) que gradam para depósitos psefíticos (St e Sm) ao topo. Além da fácies Gl ser observada na base de camadas que gradam para granulações mais finas, ela também é notada em delgados estratos compostos apenas por ela (Figura 11F).

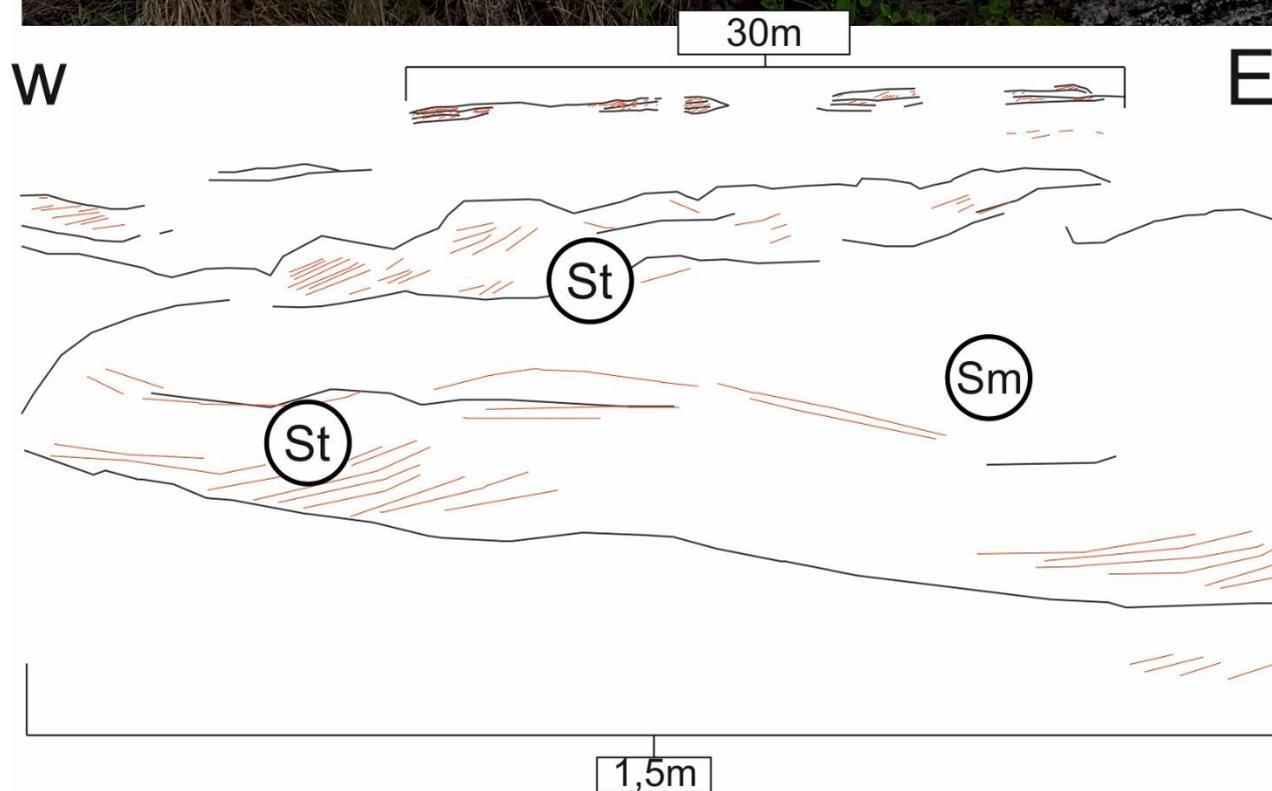
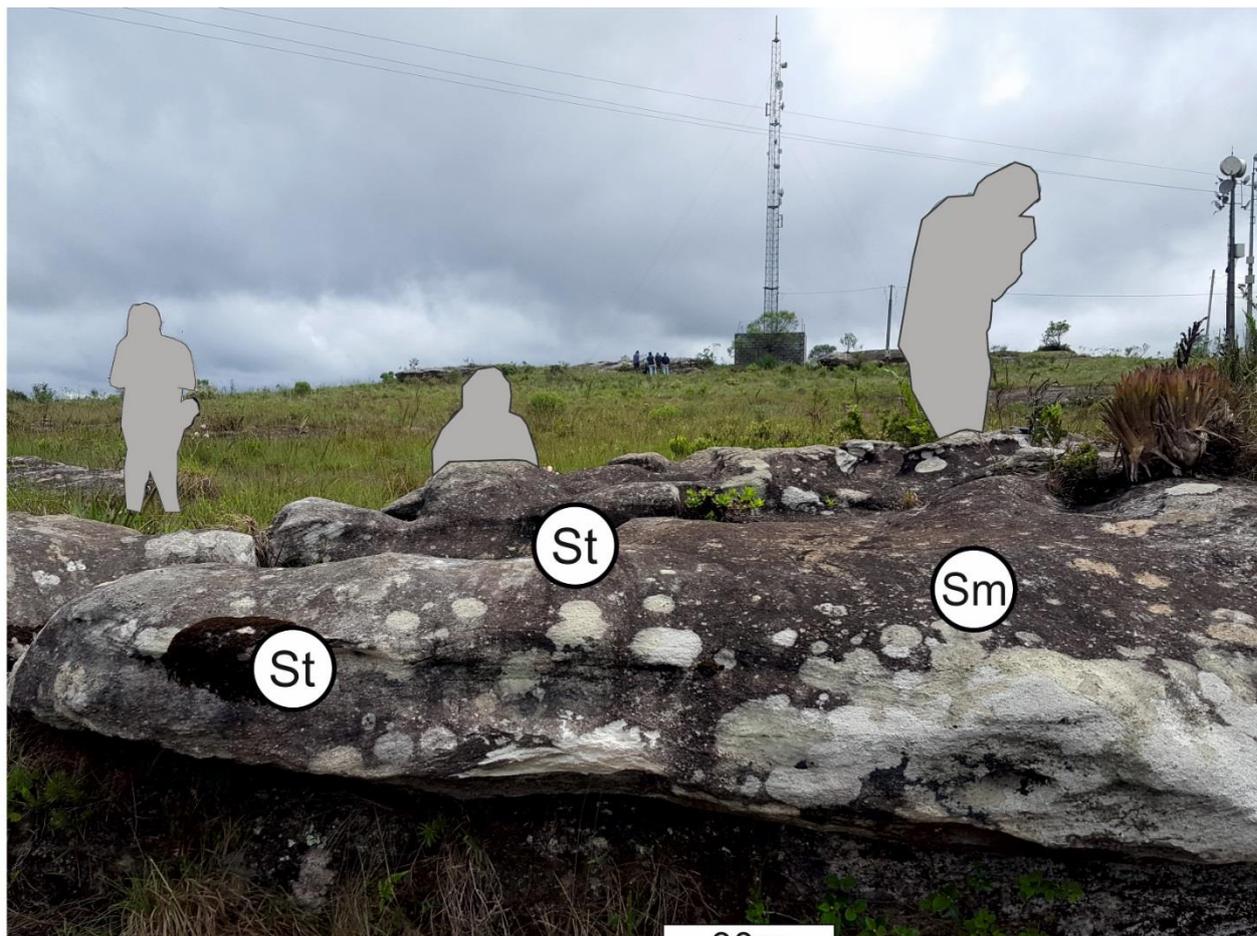


Figura 17– Representação do afloramento da Fazenda São José, Campo Largo, PR. Em vermelho são representadas as estruturas sedimentares, em preto são mostradas as geometrias dos depósitos. Notar a grande extensão e forma tabular dos depósitos na região mais afastada da foto – Foto de Aquino (2019)

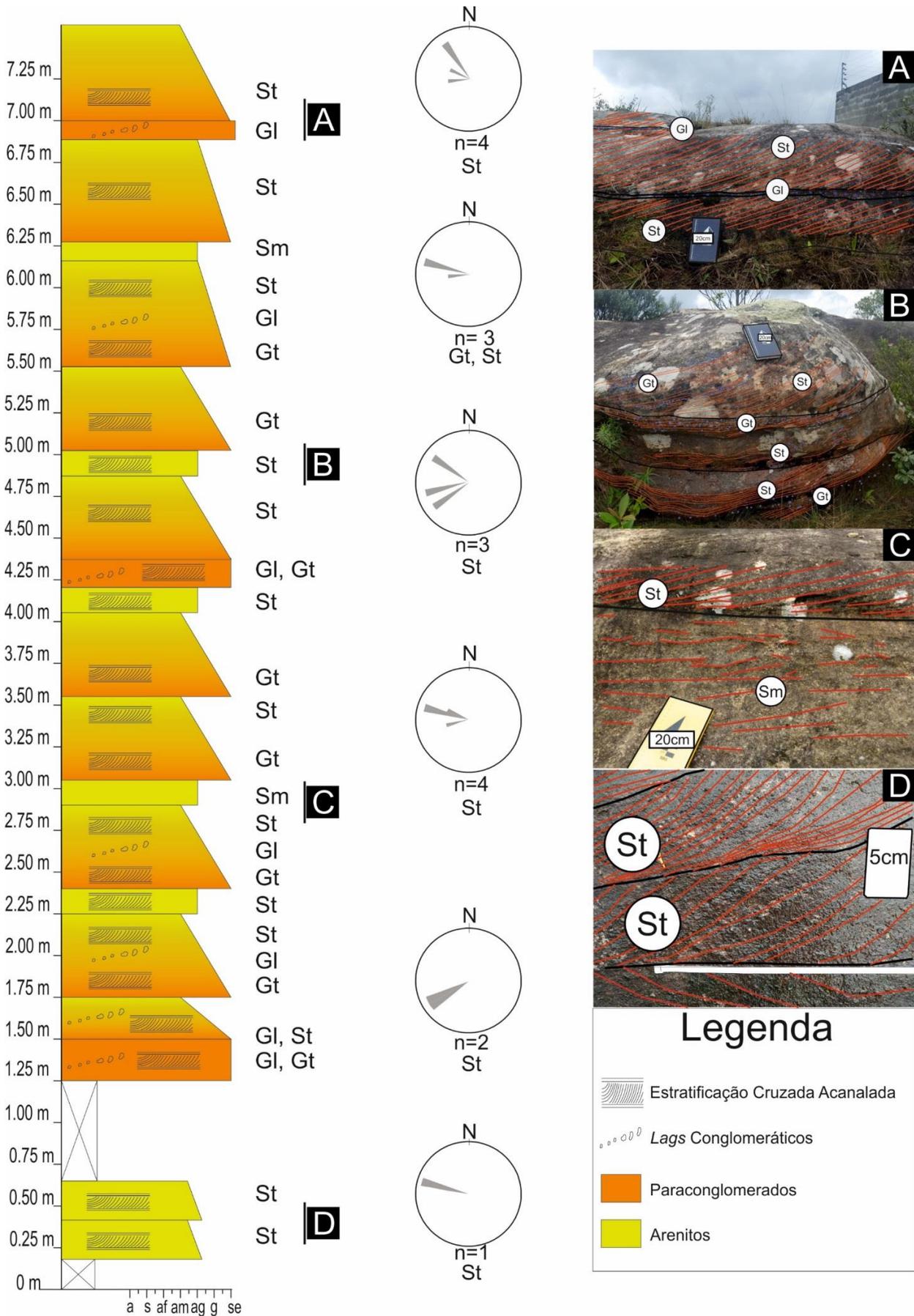


Figura 18 - Seção tipo do afloramento da Fazenda São José, Campo Largo, PR. As letras em preto representam as estruturas observadas ao longo no afloramento e representadas na seção, como nas fotos. Nas fotos as linhas pretas representam a geometria, enquanto as linhas vermelhas representam as estratificações, em azul são representados os depósitos residuais.

No total, foram obtidas 17 medidas de paleocorrentes (Figura 18) a partir do ângulo dos *foresets* das estratificações cruzadas acanaladas. A direção de mergulho dos *foresets* varia entre  $250^{\circ}$  e  $320^{\circ}$ . Essa variação de direção indica que o agente de transporte fluía em direção geral para oeste, mas as formas de leito formadas pelo seu fluxo (dunas em geral) apresentavam cristas sinuosas, o que acaba sendo representado no diagrama de rosetas.

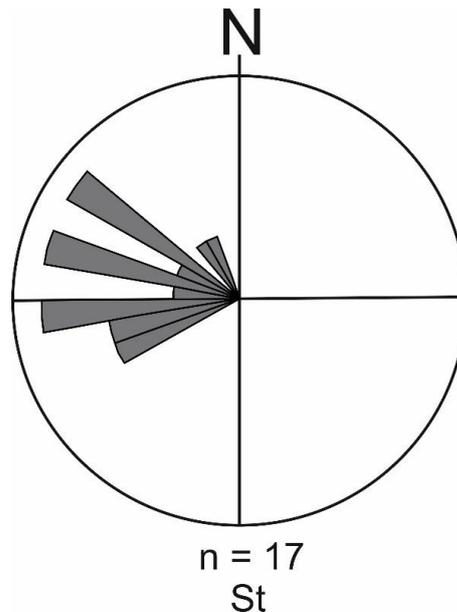


Figura 19 – Diagrama de Rosetas das paleocorrentes medidas na Fazenda São José

O padrão deposicional verificado ao longo da seção (Figura 17) sugere ciclos deposicionais em que a deposição começava a partir de um fluxo de maior energia (maior capacidade para transportar sedimentos grossos) para então gradar para um ciclo de menor, isso é evidenciado pelas camadas mais grossas representadas pelas fácies G1 e Gt que gradam para as fácies St e Sm, de menor granulometria.

A fácies G1 é considerada como a de maior granulometria da seção, nela há uma maior concentração de grânulos e seixos do que em qualquer outra fácies. O processo interpretado para a formação dessa fácies seria de que esses depósitos seriam residuais e acumulados a partir do *by-pass* de sedimentos de granulometria areia ou mais finos (Stevenson *et al.* 2015). Além de terem sido observadas na base de *cosets* de barras em que ocorrem as fácies Gt e St, também foram verificadas em camadas individualizadas entre outras camadas (Figura 11F). As superfícies de reativação observadas (Figura 19) indicam pulsos de energia no fluxo que erodiram o substrato e em seguida depositaram sedimentos com um ângulo de mergulho diferente.

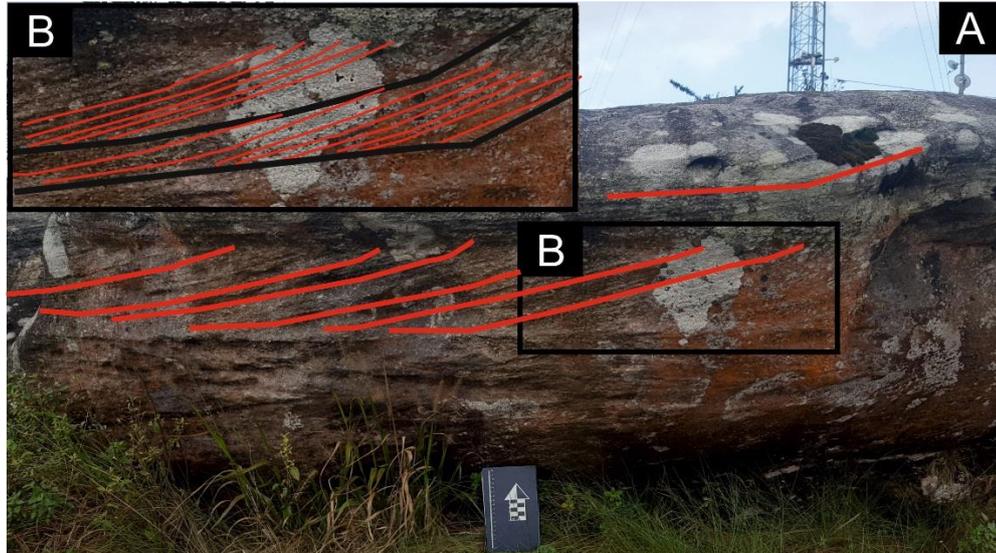


Figura 20 – Afloramento na Fazenda São José (A) Representação das estratificações cruzadas acanaladas em vermelho. (B) Detalhe para as estratificações cruzadas (em vermelho) interrompidas por superfícies de reativação (preto).

A linha 275 (Figura 21) possui todas as 5 radarfácies (Rf1, Rf2, Rf3, Rf4 e Rf5), todas as radarfácies possuem geometria tabular sinuoso. As radarfácies Rf1, Rf4 e Rf5 apresentam refletores com mergulho para W. Na região oeste do radargrama foi uma falha, posterior ao período de sedimentação foi interpretada. A linha 277 (Figura 22) possui 3 radarfácies (Rf2, Rf3 e Rf4), todas as radarfácies possuem geometria tabular a sinuosa, as radarfácies Rf4 e Rf5 possuem caimento para W. A hipérbole observada no radargrama, foi interpretada como um objeto ou um calhau circular em 2D, podendo apresentar um corpo cilíndrico ou esférico.

As linhas 275 (Figura 21) e 277 (Figura 22) de GPR apresentaram bastante semelhança com o que foi observado em afloramento. Todas as radarfácies (figura 21B e Figura 22B), em geral, apresentaram refletores com mergulho oblíquo à paralelo ao sentido da passagem da linha com direção de caimento para oeste o que condiz com o que foi observado a partir das medidas em paleocorrentes (Figura 19). A similaridade entre a Rf5 com as camadas formadas pelas fácies Gt e St ao comparar as figuras 22D e 11F. Outras semelhanças entre as camadas interpretadas com o que foi visto em superfície é seu formato já que, ambas apresentam uma relação extensão/altura elevado e sua geometria, em geral, é tabular.

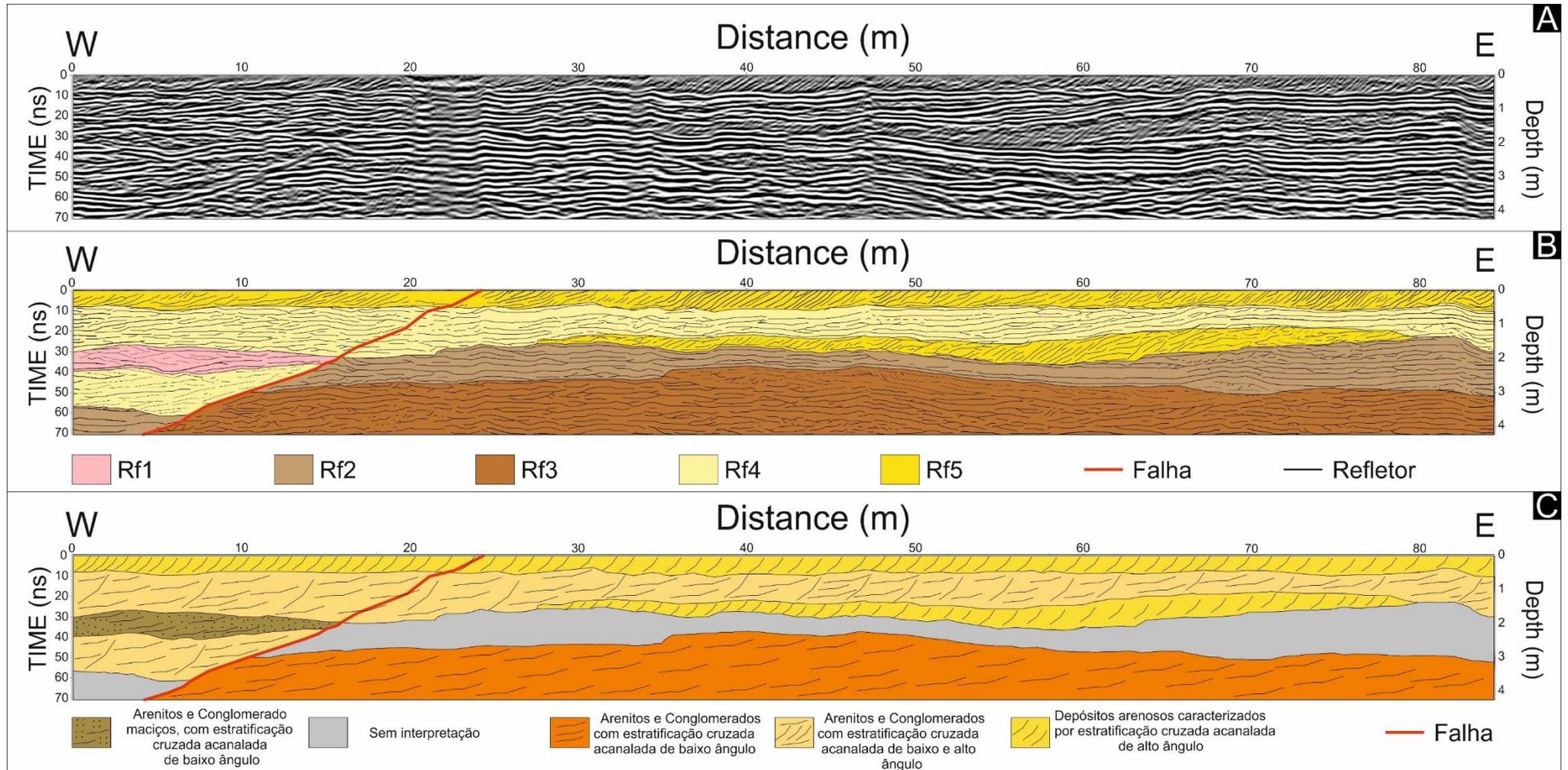


Figura 21 – Interpretação da linha 275 adquirida na Fazenda São José, Campo Largo, PR. A) linha 275 processada através do software Reflexw®. b) radarfácies na linha 275 observadas a partir da análise dos refletores; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 275 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento.

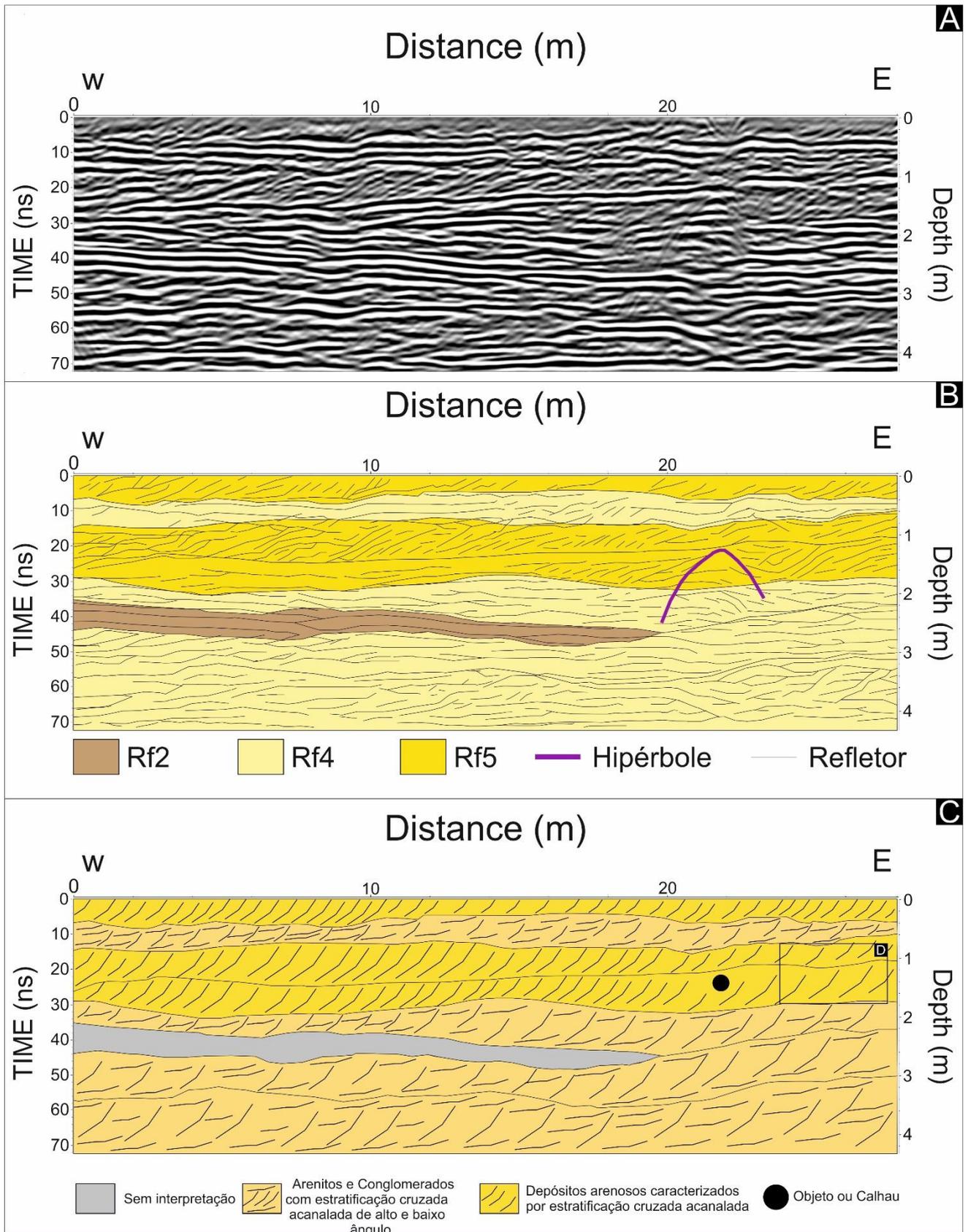


Figura 22 – Interpretação da linha 277 adquirida na Fazenda São José, Campo Largo, PR. A) linha 275 processada através do software Reflexw®. . b) radarfácies na linha 277 observadas a partir da análise dos refletor; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 277 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento.

O sistema deposicional foi interpretado como fluvial do tipo *sheet-braided*, em que os depósitos de barras laterais e frontais se estendem por dezenas e até centenas de metros. Esse tipo de sistema é bastante comum em registros eo-paleozóicos pré-vegetação, entre o Cambriano e o início do Siluriano. Foi somente a partir da época Wenlock que as plantas começaram a ocupar os continentes e modificar a morfologia dos rios de *braided* para meandrante, principalmente em regiões de clima tropical (Gibling & Davies 2012). Cabe ressaltar que a Bacia Sedimentar do Paraná estava próxima do Polo Sul durante a sedimentação da Formação Furnas, região onde atualmente não existem plantas (Assine 1999).

A geometria dos depósitos observados tanto em superfície (Figura 18), como em subsuperfície (Figura 21 e Figura 22) são tabulares e com alta razão extensão/altura, essas feições podem ser observadas em qualquer ambiente em que o agente de transporte é a água, contudo essas feições são mais comuns de serem observadas em ambientes fluviais. Além disso, estratificações cruzadas acanaladas de alto ângulo são bastante comuns ao longo de toda a região aflorante, embora não sejam consideradas evidências para diagnosticar o sistema deposicional como fluvial, também são feições mais típicas deste ambiente do que de um ambiente marinho raso ou costeiros.

Outras feições mais típicas de sistemas fluviais observadas são: a uniformidade dos depósitos paraconglomeráticos e arenosos observados ao longo da sucessão vertical; a ausência de lamitos; a baixa maturidade das rochas psefíticas já que seus grãos são subangulares e moderadamente esféricos. Mais precisamente são feições raras de serem observadas em ambientes costeiros e marinhos, já que a ação das ondas e das marés selecionam bem os sedimentos no ambiente (Nichols 2009).

As paleocorrentes avaliadas (figuras 18 e 19) no afloramento também corroboram com a interpretação do ambiente ser fluvial, já que o padrão das medidas é unimodal com uma clara tendência para o azimute 280° (direção oeste-noroeste), sendo que uma característica bastante comum de sistemas fluviais é de apresentarem uma direção principal e uma relativa variação de direção que podem representar a própria sinuosidade do rio a formação das dunas formadoras dos depósitos de barras laterais e frontais (Tucker 2003, Nichols 2009).

Pode-se correlacionar os dados de superfície e subsuperfície deste afloramento com os dados de Bergamaschi (1999) e Assine (1999) referentes às suas descrições para as rochas da primeira unidade da Formação Furnas. Ambos os autores definem

como a unidade com o caráter mais continental da formação siluro-devoniana, caracterizada pela maior granulometria e menor presença de icnofósseis. Além de nenhum icnofóssil ter sido observado em campo, diversas feições foram mais correlacionadas a sistemas fluviais do tipo *sheet-braided* do que ambientes costeiros.

## 5.2. PONTO 2 – FAZENDA THALIA

Três litologias foram identificadas na Fazenda Thalia, por ordem de frequência foram identificadas rochas areníticas, conglomeráticas e lamíticas. As rochas areníticas são os depósitos de maior ocorrência, formam depósitos decimétricos a métricos. Essas fácies possuem uma assembleia mineralógica com maturidade moderada a alta, composta principalmente por quartzo e subordinadamente por caulinita e mica branca, já sua maturidade textural é considerada moderada a alta, já que apresenta granulometria variando entre médio a grosso, com grãos subarredondados e esfericidade moderada. As rochas rudáceas possuem depósitos decimétricos ao longo de todo afloramento e frequentemente gradam para rochas psefíticas, são formadas por paraconglomerados e apresentam maturidade mineralógica alta, composta principalmente por quartzo (>95%). O grau de seleção das fácies rudáceas é moderado, com a granulometria do arcabouço variando entre grânulos e seixos, e matriz variando entre arenito médio a muito grosso. Os clastos são moderadamente esféricos e subarredondados. Os depósitos de lamitos ocorrem em apenas duas regiões observadas na localidade estudada e formam depósitos centimétricos.

Em superfície as camadas observadas em afloramento possuem espessura variando entre a escala decimétrica e a métrica, enquanto que a continuidade lateral das camadas podem chegar a até 25 metros, a geometria das camadas é bastante variável, podendo ser tabular a lenticular, no entanto, formas sigmoidais também são comuns de serem observadas (Figura 23).

Ao longo do afloramento da Fazenda Thalia, 7 litofácies foram observadas: Sit, St, Sm, Sh, Ld, Gd e Gt (Tabela 1). A seção estratigráfica-tipo (Figura 24) a qual foi elaborada para o afloramento, mostra o empilhamento de fácies da região da Fazenda Thalia. Esses depósitos apresentam pouca variação vertical das litofácies, e por vezes é possível observar um leve padrão de repetição de pacotes granodecrescentes com depósitos de conglomerados (Gt) na base seguidos por camadas arenitos (St; Sh; e Sm) no topo.

A fácies lamítica (Ld) é bastante restrita e foi observada apenas em um nível estratigráfico, sobreposta a depósitos areníticos (St e Sh) (Figura 24). Esta litofácies apresenta estruturas de deformação pós deposicionais (estrutura de carga e em chama) relacionadas à carga imposta pelas camadas de conglomerados (Gd) sobreposta. Nos últimos níveis da seção estratigrafia observa-se a a litofácies Sit, na qual a característica mais marcante é a presença de traços fósseis do ichnogeno *Thalassinoides*.

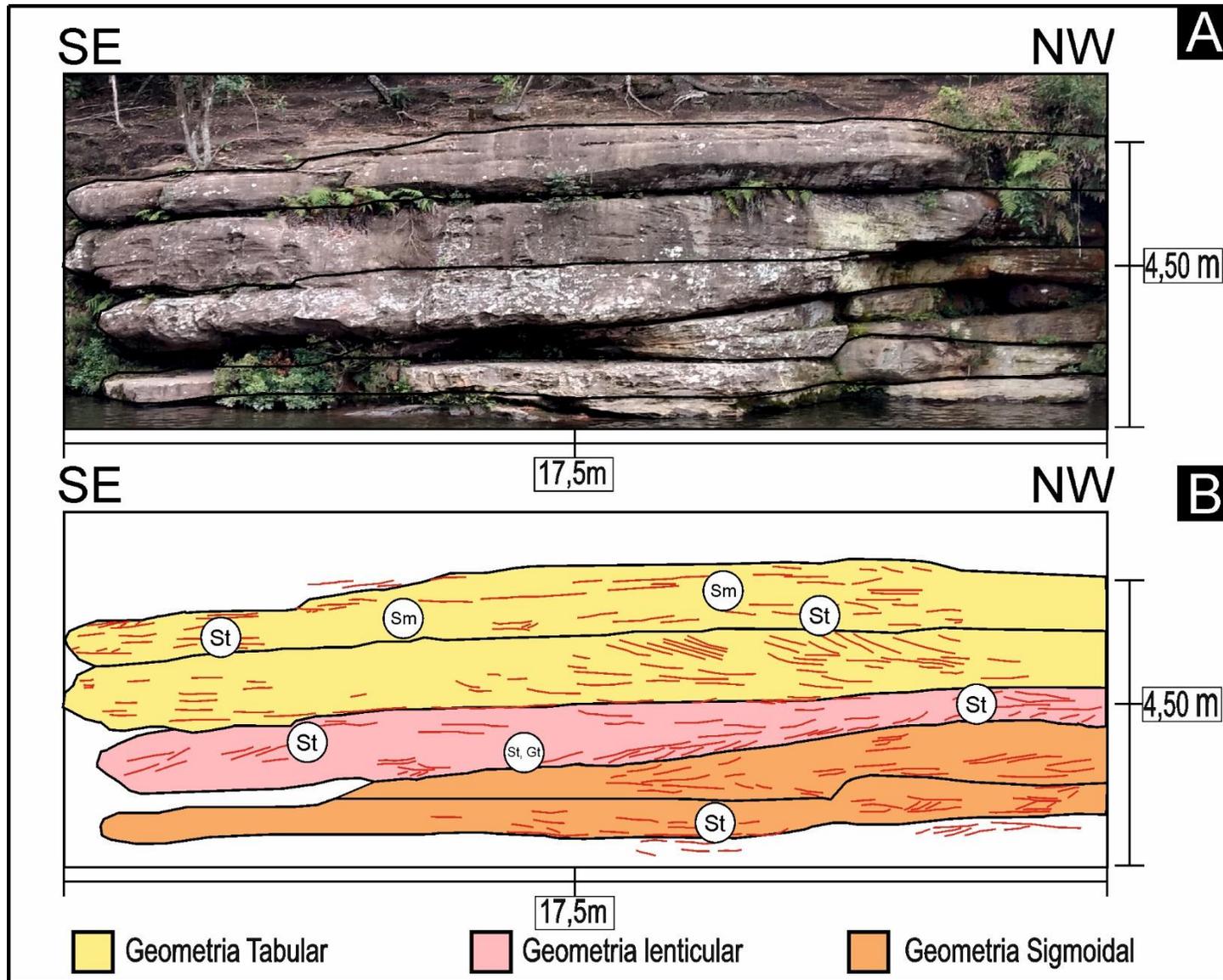


Figura 23 - Afloramento da Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. As linhas em vermelho representam as estruturas sedimentares observadas no afloramento. As linhas em preto separam as geometrias observadas através do formato dos depósitos. A) O afloramento da Fazenda Thalia; b) as geometrias interpretadas através da análise do afloramento da Fazenda Thalia.– Foto de Aquino (2020).

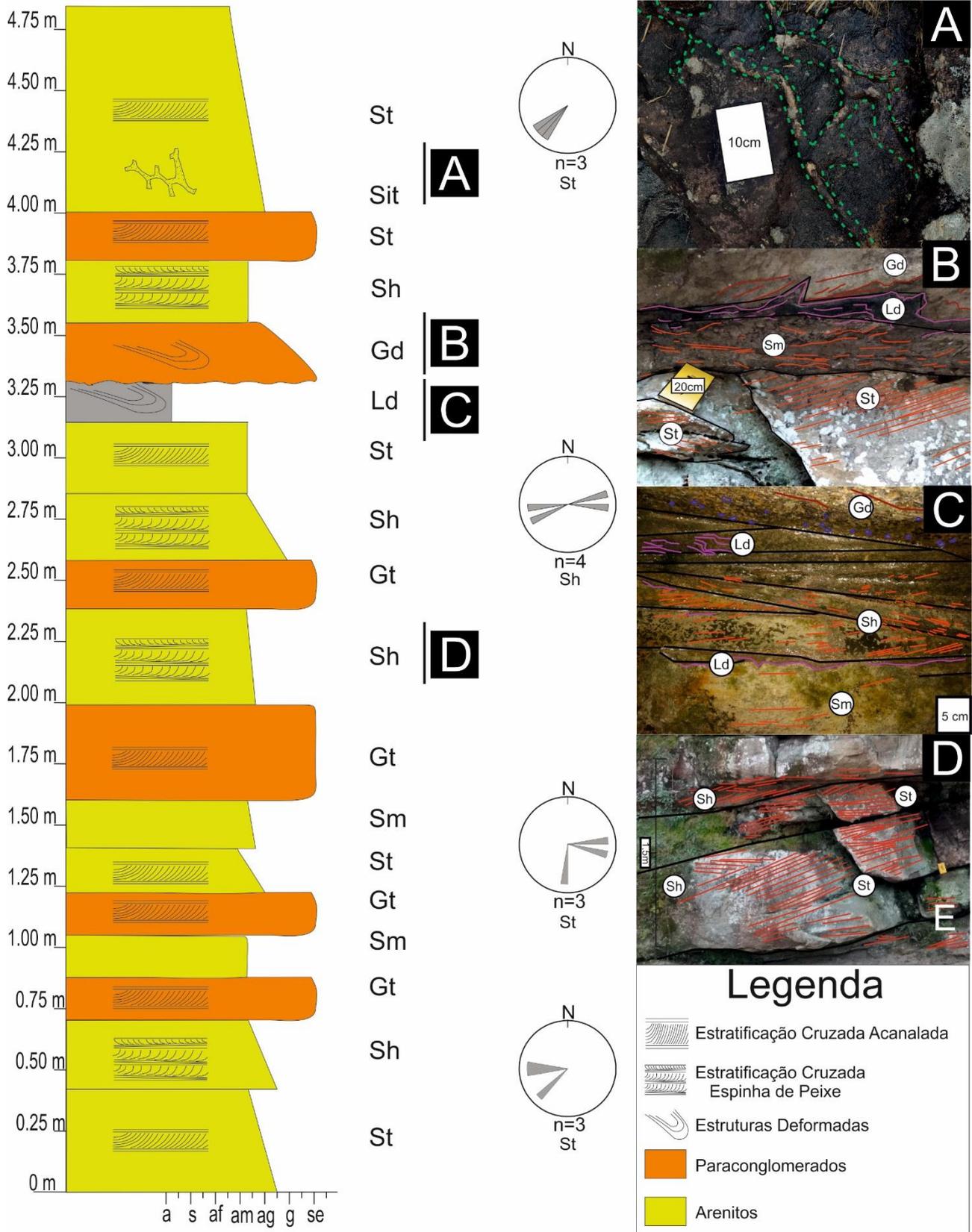


Figura 24 - Seção tipo do afloramento da Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. As letras em preto representam as estruturas observadas ao longo no afloramento e representadas na seção, como nas fotos. Nas fotos as linhas pretas representam a geometria, enquanto as linhas vermelhas representam as estratificações, em azul são representados os depósitos residuais, em verde tracejado é mostrada a região onde foi interpretada os icnofósseis *thalassinoides*. Em roxo são representadas as estruturas de deformação analisadas na litofácies Ld.

No total, foram obtidas 13 medidas de paleocorrentes no afloramento da Fazenda Thalia, sendo que 9 medidas foram tiradas a partir dos *foresets* de estratificações cruzadas acanaladas e 4 medidas foram tiradas a partir dos *foresets* de estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe. A direção de mergulho principal das estratificações cruzadas acanaladas tem seu azimute em  $230^\circ$  (Figura 25A), contudo, há uma grande variação desta direção ao longo das estruturas no afloramento, já que foram observadas estruturas mergulhando para o azimute  $90^\circ$  até  $280^\circ$ . A maior parte destas estratificações apresenta mergulho baixo (de  $5^\circ$  a  $15^\circ$ ), e estratificações cruzadas com mais de  $20^\circ$  não foram observadas no afloramento.

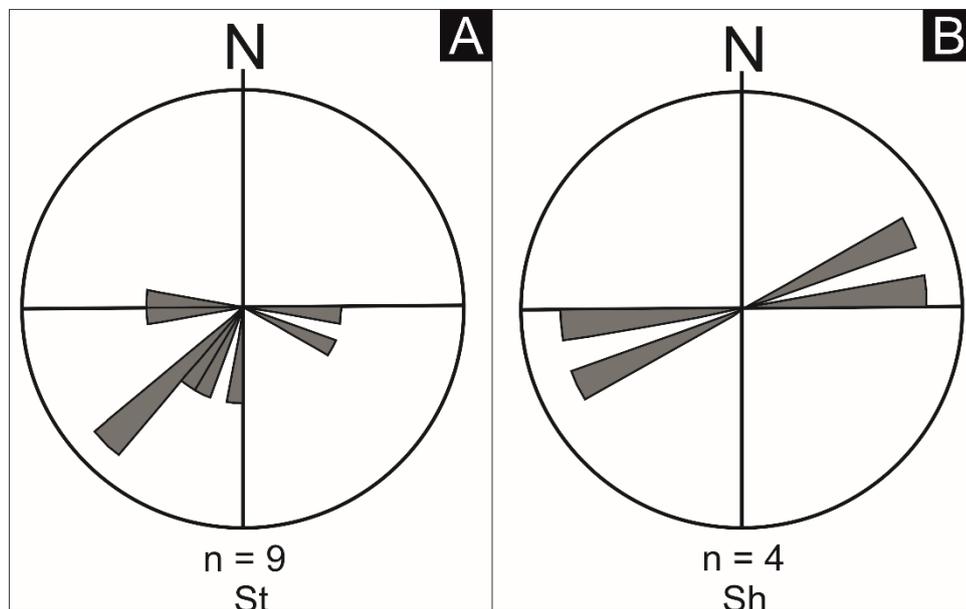


Figura 25 - Diagramas de Rosetas das paleocorrentes medidas na Fazenda Thalia: a) das estratificações cruzadas acanaladas s; b) das estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe.

Conforme mencionado anteriormente, apenas 4 medidas foram obtidas a partir da direção de mergulho das estratificações cruzadas do tipo espinha de peixe, pois além de serem de ocorrência subordinada, muitas vezes se localizavam em porções de difícil acesso (por exemplo, paredão na margem oposta do rio) As medidas obtidas apresentaram padrão bimodal espelhado (Figura 25B), tendo suas direções principais de mergulho de  $80^\circ$  e  $260^\circ$ , com mergulho baixo, variando entre  $10^\circ$  e  $15^\circ$ .

O empilhamento das associações de litofácies observado na seção estratigráfica (Figura 24) indica que o sistema deposicional apresentava um caráter energético inconstante, no qual a energia do sistema era bastante variável ao longo do tempo. Foi possível observar uma certa ciclicidade nos pacotes ao identificar um padrão granodecrescente no qual a sucessão das fácies iniciaria com a deposição de

fácies conglomeráticas (Gt e Gd) na base, passando para depósitos arenosos (St, Sm, Sh), e estes, por sua vez, seriam sucedidos por depósitos lamosos (Ld), caso a energia do ambiente diminuisse o suficiente para que o agente de transporte permitisse a deposição de sedimentos de granulometria mais fina. Também foram observadas superfícies de reativação relacionadas à fácies St ao longo do afloramento (Figura 25).



Figura 26 – Superfícies de reativação observadas no afloramento da fazenda Thalia. As superfícies de reativação estão marcadas em preto. As linhas em vermelho representam estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo relacionadas as fácies St.

A linha de GPR 281 (Figura 27) possui 4 radarfácies (Rf1, Rf2, Rf4 e Rf5), e todas as radarfácies possuem geometria tabular a lenticular. As radarfácies Rf4 e Rf5 apresentam refletores com mergulho para NW. A linha de GPR 282 (Figura 28) possui 4 radarfácies (Rf1, Rf2, Rf3 e Rf4), e todas as radarfácies possuem geometria tabular a sinuosa. A radarfácies Rf4 apresenta refletores com mergulho para SW.

A similaridade entre a geometria das camadas observadas nas linhas de GPR 281 e 282 com as geometrias analisadas em afloramento (figuras 23 e 29) é moderada. Os depósitos mais superiores observados em afloramento possuem geometria tabular, tal qual a geometria dos depósitos superiores analisados principalmente pela linha de GPR 282 (Figura 28).

Em superfície os depósitos inferiores apresentam geometrias mais sigmoidais e lenticulares, enquanto que para o que foi observado na linha de GPR, a geometria sigmoidal não é nítida, no entanto é possível observar nas camadas uma geometria

com uma forte sinuosidade e mergulho entre os depósitos interpretados. Contudo, talvez por falta de resolução do equipamento, ou pela falta de extensão lateral na linha 282, não há uma perfeita paridade entre o que foi interpretado em subsuperfície e o que foi observado em afloramento.

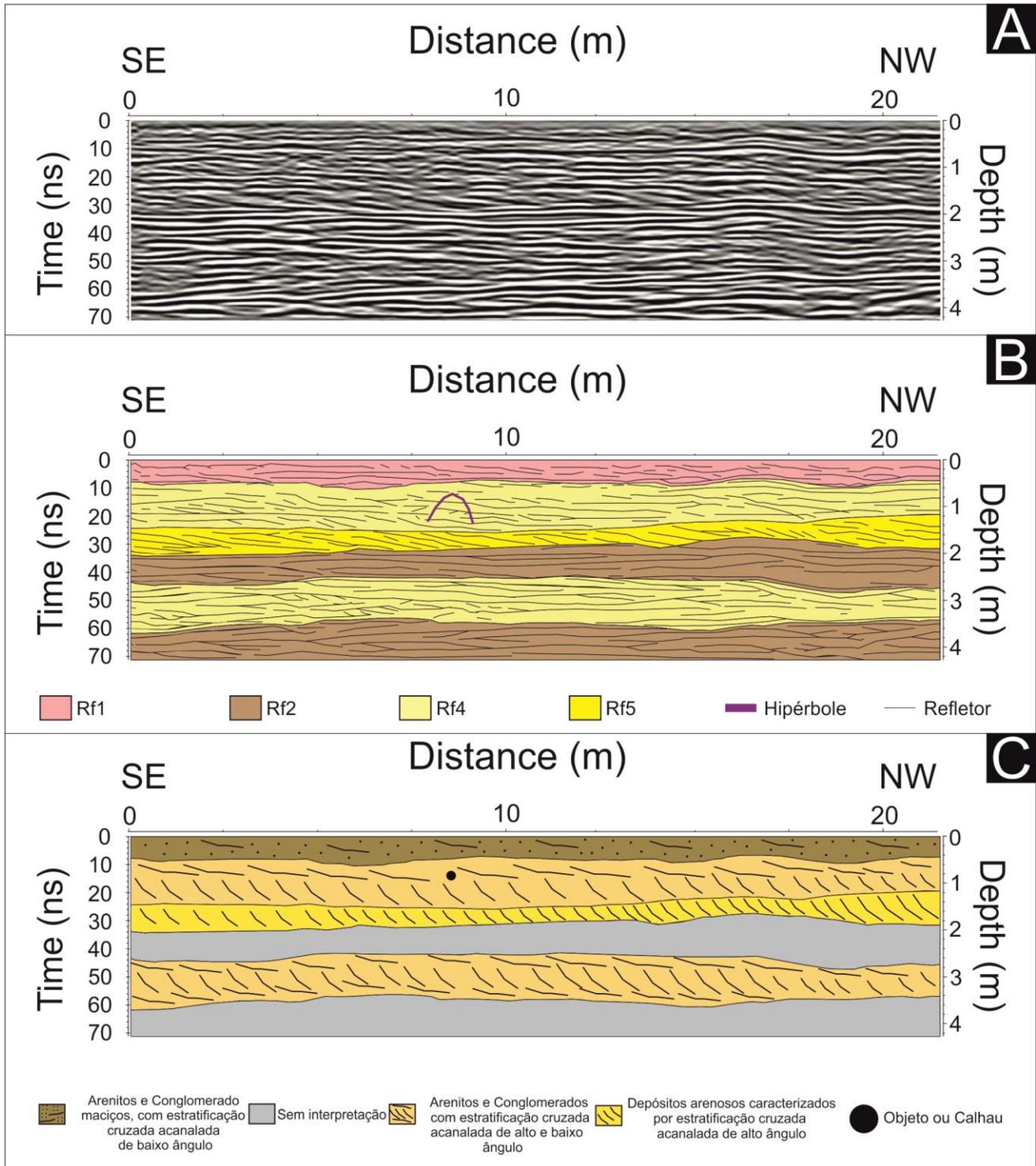


Figura 27 – Interpretação da linha 281 adquirida na Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. A) linha 281 processada através do software *Reflexw*®; b) radarfácies na linha 281 observadas a partir da análise dos refletor; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 281 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento.

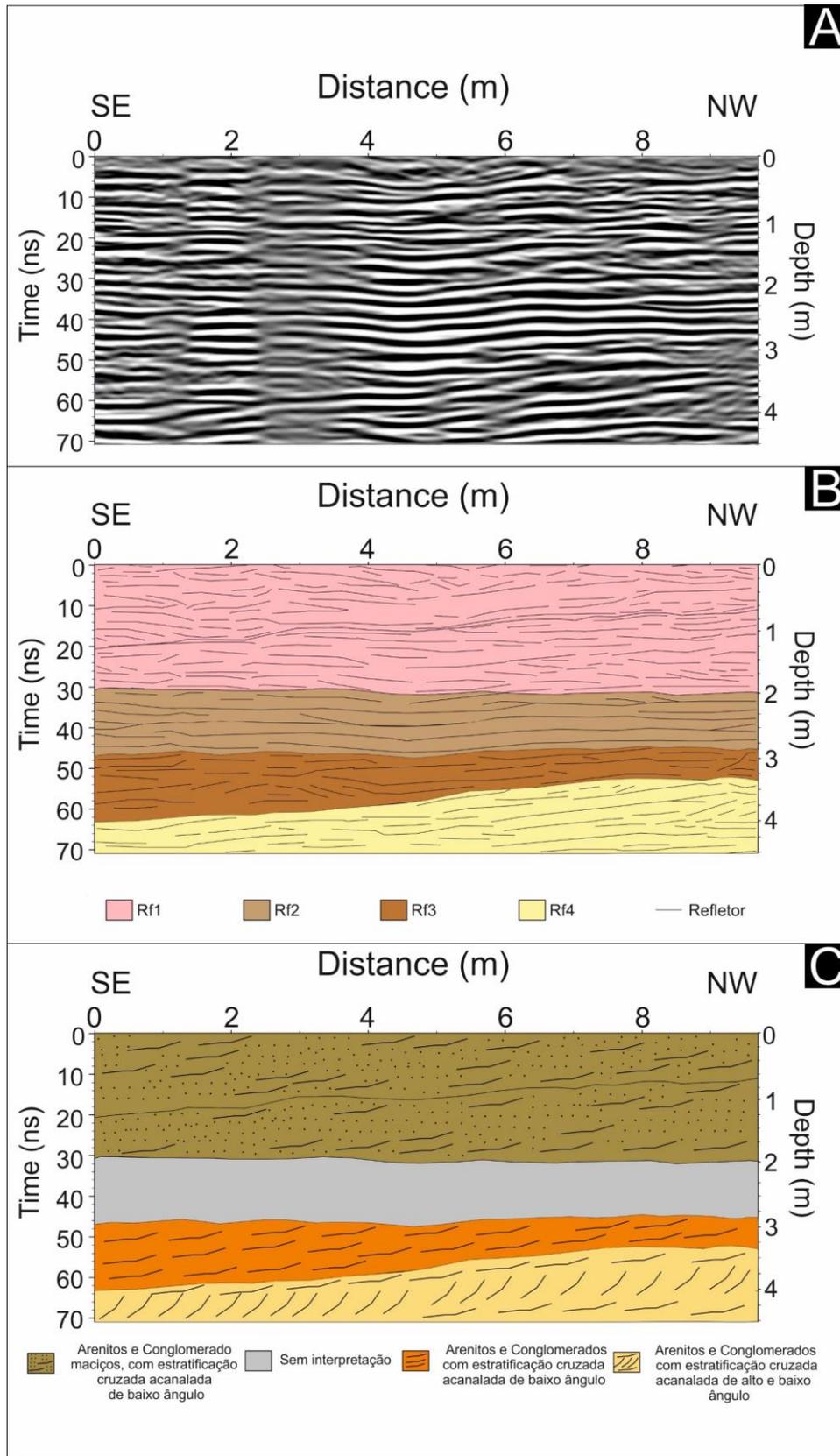


Figura 28 – Interpretação da linha 282 adquirida na Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR. A) linha 282 processada através do software *Reflexw*®; b) radarfácies na linha 282 observadas a partir da análise dos refletorés; c) Interpretação dos depósitos de subsuperfície na região da linha 282 a partir da análise das radarfácies e correlação com os dados de afloramento.

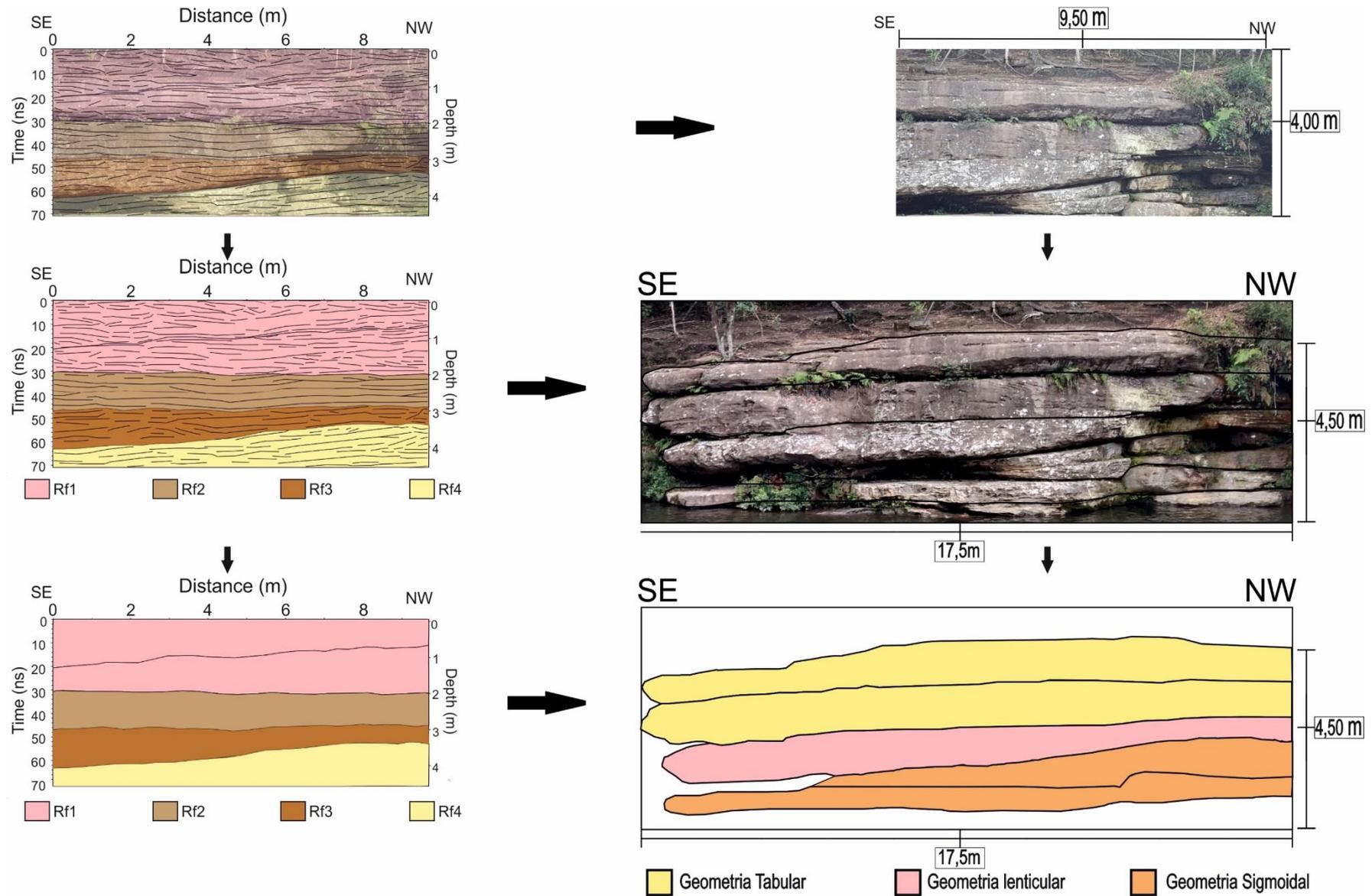


Figura 29 – Geometrias analisadas tanto no afloramento da Fazenda Thalia, Balsa Nova, PR, como na sua respectiva linha de GPR (linha 282).

A partir da associação de fácies, da presença de icnofósseis *Thalassinoides* e pelas geometrias dos depósitos observados tanto em afloramentos como nos dados de GPR, o sistema deposicional pode ser interpretado como um sistema costeiro a marinho raso. Esses ambientes apresentam comumente estruturas e feições representativas de processos sedimentares originados pela ação de marés e de ondas, com extensos depósitos de barras de baixo ângulo e geometrias sigmoidais (Nichols 2009). A presença apenas de material terrígeno encontrado nestes depósitos pode ser atribuído a paleolatidade elevada da época da deposição da Formação Furnas nesse momento já que depósitos carbonáticos são inibidos de serem precipitados em climas extremamente frios como o ambiente polar (Assine 1996; Nichols 2009). Além disso, por se tratar de depósitos predominantemente de granulometria mais grosseira (arenito e conglomerado), se houvessem depósitos bioclásticos, estes podem não ficar preservados devido à alta energia dos fluxos associados.

As geometrias observadas dos depósitos foram definidas como tabulares a sigmoidais, a partir da análise dos depósitos de superfície (Figura 23) e dos depósitos de subsuperfície (figuras 27 e 28). Estas duas geometrias são comuns para depósitos de ambiente marinho raso, em que o fluxo do agente de transporte de sedimentos seria condicionado pelo mergulho natural de uma zona costeira. Além disso por conta do espriamento ocorrente na região litoral rasa, as estruturas sedimentares observadas mais comuns são estratificações cruzadas de baixo ângulo, sendo essas, as estruturas mais frequentemente observadas no ponto estudado tanto em superfície quanto em subsuperfície (Nichols 2009). As direções de paleocorrentes obtidas nesse ponto também corroboram com a direção da paleolinha de costa já apontada por trabalhos anteriores (p.e. Assine 1996).

Uma feição observada que é importante ressaltar é a presença da litofácies Sit, na qual são observados rastros fósseis do icnogênero *Thalassinoides* (Figura 11A), esta estrutura é formada a partir dos hábitos de vida de crustáceos decápodes, uma feição somente observada em ambientes marinhos ou com forte influência marinha (como ambientes lagunares ou estuarinos). Outras feições analisadas ao longo do afloramento que são relevantes para a questão paleoambiental é a presença de estratificação do tipo espinha de peixe, uma estrutura sedimentar típica de ambientes costeiros, em que a alternância de marés (enchente e vazante) permite a formação desse tipo de estruturas (Tucker 2003, Nichols 2009, Yanin & Baraboshkin 2013).

A maturidade textural e mineralógica das rochas também condiz com ambiente marinho raso. A presença de depósitos de lamitos, embora rara, implica na diminuição de energia no ambiente, o que pode indicar momentos de estagnação entre períodos de maré, porém devido a predominância de depósitos de granulometria mais grosseira, muitos desses depósitos de lamitos podem ter sido erodidos por esses fluxos de mais alta energia. A presença de conglomerados com deformações internas (litofácies Gd) podem implicar eventos de mais alta energia e de rápida deposição. Ambas as feições (fácies Ld e Gd) permitem interpretações de processos que podem ocorrer em um ambiente marinho raso, momentos de mais baixa energia no sistema é uma característica relativamente comum nesses ambientes. Assim como eventos de mais energéticos como por exemplo, tempestades, os quais também são frequentemente observadas no registro geológico em contextos semelhantes, mesmo que não preservando estruturas típicas como estratificações cruzadas *Hummocky*, que são bastante raras de se formarem em depósitos rudáceos (Assine 1996, Nichols 2009).

Os padrões de paleocorrentes (figuras 24, 25A e 25B) corroboram com a interpretação de um ambiente marinho raso. As paleocorrentes observadas nas estratificações cruzadas acanais (Figura 25), embora apresentem caráter unimodal, possuem uma grande variação no azimute de suas estruturas, o que pode ser justificado pela mudança de direção de sentido do fluxo principal das correntes de maré (diferentes áreas de canais e barras de maré). No segundo padrão observado (Figura 25B) há estruturas com direção de mergulho espelhado, isto adiciona ainda mais à interpretação de que o fluxo do agente de transporte apresentaria grande variação de direção, o que pode ser explicado pela variação de direção de correntes de maré em momentos de maré enchente e vazante. As superfícies de reativação observadas principalmente neste afloramento podem corroborar com a ação da maré, pois podem indicar momentos de estagnação da energia do ambiente e a posterior retomada do fluxo o que acarretaria em pequenas superfícies erosivas truncando os sets de estratificação cruzadas. Essa situação pode ser associada a momentos de parada entre as marés e a posterior retomada do fluxo (p.e. Fritzen 2019). O padrão unimodal do paleotransporte indicaria que a maré vazante seria a mais significativa nesse momento, ou que o fluxo da maré enchente ingressaria em uma outra porção do sistema.

Pode-se correlacionar os dados de superfície e de subsuperfície deste afloramento com os dados de Bergamaschi (1999) e Assine (1999) referentes às suas descrições para as rochas da segunda unidade da Formação Furnas. Ambos os autores definem como a unidade com o caráter mais marinho da formação siluro-devoniana, caracterizada pela menor granulometria e maior presença de icnofósseis. Além dos icnofósseis do icnogênero *Thalassinoides*, diversas outras feições foram mais correlacionadas a sistemas marinhos rasos do que ambientes fluviais.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise dos dois afloramentos estudados neste trabalho é possível concluir que o sistema deposicional da Formação Furnas variou durante o período de deposição de seus sedimentos.

A região do afloramento da Fazenda São José é constituída por depósitos continentais, com características faciológicas de um ambiente fluvial do tipo *sheet-braided*, um sistema fluvial comum durante os períodos eo-paleozoicos, principalmente em formações sedimentares depositadas em paleolatitudes elevadas (Assine 1999, Gibling & Davies 2012).

A região do afloramento da Fazenda Thalia é formada por depósitos marinho rasos, diagnosticados principalmente pela presença de icnofósseis do icnogênero *Thalassinoides*, exclusivos destes ambientes, além de outras características que reforçam esta análise, com estratificação do tipo espinha de peixe, bimodalidade de paleocorrentes (Yanin & Baraboshkin, 2013).

A análise de GPR consistiu em 4 linhas traçadas nos dois afloramentos estudados, as linhas 275 e 277 para o afloramento da Fazenda São José, e as linhas 281 e 282 para o afloramento da Fazenda Thalia. O estudo dos dados de georradar colaborou com a interpretação dos dados observados em afloramentos, a partir dos 4 radargramadas, 5 radarfácies foram distinguidas entre si a partir do método apresentado por Neal (2004).

As características mais marcantes observadas foram a grande extensão lateral observada nos depósitos da Fazenda São José, que corroboram com interpretação de um ambiente fluvial do tipo *sheet-braided*, e a variação do mergulho dos depósitos interpretados para a Fazenda Thalia, que reforçam a ideia de um ambiente sedimentar marinho raso com sua característica bimodalidade em suas paleocorrentes.

O trabalho verifica o caráter misto para o ambiente sedimentar da Formação Furnas, como Borgui (1993), Assine (1996), Bergamaschi (1999), Carneiro (2011). Contudo fica proposto novos trabalhos com novas expedições de campo para avaliar toda a extensão vertical e horizontal desta formação sedimentar, já que a Formação Furnas ocorre em uma área grande (figura 9), enquanto que este trabalho avalia 2 afloramentos em um raio de 50 km entre si. Além disso, fica proposto uma avaliação de dados em GPR em maior frequência, pois com um sistema de 400 MHz não foi suficiente para avaliar com precisão todas as camadas estudadas, visto que a radarfácies Rf2 não apresenta resolução suficiente para analisar os estratos com estruturas sedimentares de pequeno porte.

A análise em conjunto de dados de superfície (afloramentos) e de dados de subsuperfície com o uso do GPR apresentou-se de grande validade para a compreensão dos sistemas deposicionais em sucessões sedimentares pretéritas, em especial aquelas de monotonia litológica significativa, uma vez que a associação dessas duas técnicas se complementam e ressaltam informações que individualmente não seria possível de se observar.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Allen, J.R.L., 1982. Sedimentary Structures: Their Character and Physical Basis. Volume 1. Developments in Sedimentology. **30a**. Elsevier, Amsterdam.
- Annan, A. P. 2002. GPR – History, Trends and Future Developments. Subsurface Sensing Technologies and Applications. Ontario. **3**(4): 253 – 270p.
- Assine, M.L. 1996. Aspectos da Estratigrafia das Sequências Pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil. Tese de doutorado, 207p. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Assine, M.L. 1999. Fácies, Icnofósseis, Paleocorrentes e Sistemas Depositionais da Formação Furnas no flanco sudeste da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências. **29**: 357–370p.
- Bergamaschi, S., 1999. Análise Estratigráfica do siluro-devoniano (Formações Furnas e Ponta Grossa) da Sub-Bacia do Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil (Tese de PHD não publicada). Universidade de São Paulo, São Paulo. 167p.

- Bergamaschi, S.; Pereira, E. 2001. Caracterização de Sequências Depositionais de Terceira Ordem para o siluro-devoniano na Sub-Bacia de Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil. In MELO, J.H.G.; TERRA, G.J.S. (eds.) Correlação de sequências paleozóicas sulamericanas. Petrobras, Rio de Janeiro. 63-72p.
- Boggs, S. 2014. Principles of Sedimentology and Stratigraphy. 5ª Ed. Edinburgh: Pearson. 565p.
- Bogo, M. Souza, M. C., Angulo, R. J. Barboza, E. G., Rosa, M. L. C. C. 2015. Arquitetura deposicional da barreira holocênica na porção meridional da Ilha de São Francisco do Sul, SC, *Brasil. Pesquisas em Geociências*. **42**(3): 281 – 295p.
- Borghi, L. Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas em afloramentos da borda leste da Bacia sedimentar do Paraná, Estado do Paraná, Brasil. 1993. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 227p.
- Campbell, C.V., 1967. Lamina, laminaset, bed and bedset. *Sedimentology*. Algiers. **8**:7–26p.
- Carneiro, G. P. 2011. Caracterização e Zoneamento Estratigráfico da Formação Furnas por Integração de Dados Faciológicos, Petrográficos E Petrofísicos.). Dissertação (Mestrado em Paleotologia e Estratigrafia). Unversidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 136p.
- Ciguel, J. H. G. 1989. Bioestratigrafia dos Tentaculitoidea no flanco oriental da Bacia do Paraná e sua ocorrência na América do Sul (Ordoviciano-Devoniano). Dissertação (Mestrado em Paleotologia). Universidade de São Paulo, São Paulo. 237p.
- Dino, R. Rodrigues, M. A. C. 1995. Palinomorfos eodevonianos da Formação Furnas – Bacia do Paraná. *Anais da Academia Brasileira de Geociências*. **67**(1): 107-116p.
- Fritzen, M. R., Cagliari, J., Candido, M., Lavina, E. L. C. 2019. Tidal bar cyclicity record in the Lower Permian: The Rio Bonito Formation, Paraná Basin, southern Brazil. *Sedimentary Geology*. **381**: 76-83p.
- Fúlfaro, V. J., Saad, A. R., Santos, M. V., Vianna, R. B. 1982. Compartimentação e Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*. **12**(4): 233-256p.

Gibling, M. R., Davies, N. S. 2012. Paleozoic landscapes shaped by plant evolution. *Nature Geoscience*. Londres. **5**: 99-105p.

IBGE – Instituto Brasileiro Geografia e Estatística. 2019. Malha Municipal. Brasil. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto> >. Acessado em: 08, out, 2020.

James, N. P., Dalrymple, R. W. *Facies Models 4*. Stittsville: Geological Association of Canada. p. 594.

Lange, F. W.; Petri, S. The Devonian of the Paraná Basin. In: Bigarella, J. J. (Ed.). *Problems in Brazilian Devonian geology*. Boletim Paranaense de Geociências. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1967. **21-22**: 5-55p.

Leandro, C. G., Barboza, E. G., Caron, F., Jesus, F. A. N. 2019. GPR Trace Analysis for Coastal Depositional Environments of Southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*. **162**:1-12p.

Lobato, G.; Borghi, L. 2005. Análise estratigráfica da Formação Furnas (Devoniano Inferior) em a In: CONGRESSO DE P&D EMPETRÓLEO & GÁS, 3. Salvador. Anais. **3**.

Miall, A. D. 1977. A review of the braided river depositional environment: *Earth Science*. Revs. **13**: p. 1-62.

Miall, A. D. Lithofacies types and vertical profile models in braided stream deposits: a summary, in A. D. Miall, ed., *Fluvial Sedimentology*: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir. **5**: 597-604p.

Miall, A.D. 1981. Analysis of fluvial depositional systems. Education Course Note Series. American Association of Petroleum Geologists, **20**: 1-75p.

Miall A, D. 1999. Principles of Sedimentary Basin Analysis. 3rd Ed. Toronto: Springer. 634p.

Milani, E. J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 255p.

- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B. 2007a. Bacia do Paraná. *Boletim De Geociências da Petrobras*. **15**(1): 265-287p.
- Milani, E. J. França, A.B. Medeiros. R. A. 2007b. Roteiros Geológicos: Rochas Geradoras e Rochas Reservatórios da Bacia do Paraná, Faixa Ocidental de Afloramentos, Estado do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*. **15**(1): 135-162p.
- Mitchum, R. M., Vail, P. R., Thompson, S. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, part two: The Depositional Sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton, C.E. *Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration*. AAPG. 53-62p.
- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science*. **66**: 261–330p.
- Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. Chichester: Wiley & Sons. 432p.
- Oliveira, E. P. 1912. O Terreno Devoniano ao Sul do Brasil. *Anais da Escola de Minas de Ouro Preto*. **14**: 31-41p.
- Paraná. 2006. Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG). *Potencialidades e Fragilidades das Rochas do Estado do Paraná. Relatório Técnico*.
- Paraná. 2004. Secretaria De Estado Do Meio Ambiente E Recursos Hídricos (SEMA)., Instituto Ambiental Do Paraná (IAP). *Área de Proteção Ambiental da Escarpa Devoniana. Plano de Manejo*.
- Pereira, E., Bergamaschi, S., Rodrigues, M.A.C. 1992. Sedimentary evolution of the Ordovician, Silurian and Devonian sequences of Paraná Basin in Brazil. *Geol. Paläontol*. **3**: 779–792p.
- Pereira E., Carneiro, C. D. R., Bergamaschi, S. Almeida, F. F. M. 2012. Evolução das Sinéclises Paleozoicas: Províncias Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná. In: HASUI, CARNEIRO, C. D. R., ALMEIDA, F. F. M., BARTORELLI, A. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 375-394p.
- Posamentier, H.W.; Jervy, M.T. & Vail, P.R. 1988. Eustatic Control on Clastic Deposition I - Conceptual Framework. In: Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C.G.St.C.; Posamentier, H.W.; Ross, Ch.A. & Van Wagoner, J.C. (Eds.). *Sea-level*

- changes - an Integrated Approach. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication. **42**: 109-124p.
- Ross, J. L. S. 2014. Chapada dos Guimarães: Borda da Bacia do Paraná. Revista do Departamento de Geografia, USP. **28**:180 – 197p.
- Sandmeyer, K. J. Reflexw: Version 6.0. Karlsruhe: Sandmeyer, 2011.
- Santos, M. V. 2000. Relatório Técnico Consolidado da Geologia do Estado do Mato Grosso – 1:1500000. Cuiabá. Estado do Mato Grosso. Relatório Técnico. 352p.
- Sedorko, D., Netto, R. G., Assine, M. L., Tognoli, F. M.W. 2017. Chronostratigraphy and environment of Furnas Formation by trace fossil analysis: Calibrating the lower Paleozoic Gondwana realm in the Paraná Basin (Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology*. **487**: 307-320p.
- Sedorko, D., Netto, R. G., Savrda, C. E. 2018. Ichnology applied to sequence stratigraphic analysis of Siluro-Devonian mud-dominated shelf deposits, Paraná Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. **83**, 81-95p.
- Seilacher, A., 2007. Trace Fossil Analysis. Berlin: Springer. 226p.
- Silva A. J. C. L., Aragão M. A. N. F., Magalhães. A. J. C. 2008. Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil. São Paulo: Beca. 338p.
- Schneider, R.L., Muhlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.A., Nogueira, A.A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre. Anais. 41–65p.
- Soares, P.C., Landim, P.M.B., Fulfaro, V.J. 1974. Avaliação preliminar da Evolução das Bacias Intracratônicas Brasileiras. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, Anais, **4**:61-83p.
- Stanley, S. 2009. Earth System History. Nova Iorque: Freeman and Company, 580p.
- Stevenson, J. C., Jackson, C. A. L., Hodgson, D. M., Hubbard, S. M., Eggenhuisen, J. T. 2015. Deep-water Sediment Bypass. *Journal of Sedimentary Research*. **85**: 1058-1081p.
- Tucker M. E. 2003. Sedimentary Rocks in the Field. Chichester: Wiley & Sons Ltd. 249p.

Yanin, B. T., Baraboshkin. 2013. Thalassinoides Burrows (Decapoda Dwelling Structures) in Lower Cretaceous Sections of Southwestern and Central Crimea. *Stratigraphy and Geological Correlation*. Moscow, **21**(3): 280-290p.

Walker, R.G., James, N.P. 1992. *Facies models - response to sea level change*. Stittsville: Geological Association of Canada. 409p.

Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Vieira, I.S., Astolfi, M.A.M., Appi, V.T., Zanotto, O.A. 1987a. A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. *Ver. Brasil. Geociências*. **17**: 242–252p.

Zalán P.V., Wolff, S., Conceição, J. C. J., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T., Zanotto, O. A. 1987b. Tectônica e Sedimentação da Bacia Sedimentar do Paraná. In: *III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*. Curitiba. **1**: 441-477p.