

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRIEL GÓES MARINS

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM BACIAS
CONTINENTAIS: UM EXEMPLO NA FORMAÇÃO SERRA DOS LANCEIROS
- RS**

Caçapava do Sul

2021

GABRIEL GÓES MARINS

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM BACIAS
CONTINENTAIS: UM EXEMPLO NA FORMAÇÃO SERRA DOS LANCEIROS
– RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Ezequiel Galvão de Souza

Coorientador: Felipe Guadagnin

Caçapava do Sul

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M118a Marins, Gabriel Góes

Análise estratigráfica de alta resolução em bacias continentais: um exemplo na formação serra dos lanceiros - RS / Gabriel Góes Marins.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2021.

"Orientação: Ezequiel Galvão de Souza".

1. Análise Estratigráfica. 2. Alta Frequência. 3. Bacia do Camaquã. 4. Serra dos Lanceiros. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

GABRIEL GÓES MARINS

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM BACIAS CONTINENTAIS: UM
EXEMPLO NA FORMAÇÃO SERRA DOS LANCEIROS - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Geologia da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

12 de maio de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza

Orientador

UNIPAMPA

Dr. Adriano Domingo dos Reis

UFRGS

MSc. Carrel Kifumbi

UFRGS



Assinado eletronicamente por **EZEQUIEL GALVAO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/05/2021, às 08:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Carrel Kifumbi, Usuário Externo**, em 13/05/2021, às 14:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Adriano Domingos dos Reis, Usuário Externo**, em 13/05/2021, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0524527** e o código CRC **FB67B134**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico este trabalho à minha eterna professora e amiga Daniela de Rosso Tolfo, uma das melhores pessoas que tive o privilégio de conhecer e que me acolheu em diversos momentos de dificuldade. Que seu legado seja eterno em todos os seus alunos.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a minha família que sempre me apoiou nestes anos, não importando o quão difíceis fossem os tempos. Além da minha família, agradeço ao João Paulo (Jota) e aos seus pais e aos seus avós pelo apoio que me deram quando comecei essa jornada.

Agradeço aos meus orientadores Dr. Ezequiel Galvão de Souza e Dr. Felipe Guadagnin. Estendo a gratidão aos demais membros do Grupo de Pesquisa em Geologia Sedimentar da Unipampa, em especial ao meu colega geólogo Adriano Gomes Morais de Oliveira, que construiu a “vara de Jacob”, equipamento essencial para este estudo.

Agradeço aos demais professores que me inspiraram ao longo da minha trajetória pela Unipampa. Um agradecimento especial ao professor Vitalino Cesca Filho que, junto com a Dani, me orientou em diversos projetos e me ensinaram muitas coisas.

Agradeço aos meus colegas do Diretório Acadêmico da Geologia da Unipampa *AAPG Student Chapter*, que me acompanharam em diversos feitos dos quais me orgulho muito. Em especial agradeço aos companheiros do IBA, Jean Toledo, Matheus Cruz, Piero Bastos e Mayra Cunha, experiência mais marcante destes 5 anos.

Agora, um obrigado de coração para Gabriela Macedo, Gabriel Smith, Nauan Benedet, André Ramalho, Natália Pinheiro, Otávio Sturaro, Paulo Mazuque e Lucas Beling, e tantos outros amigos de geologia, farra e cumplicidade que admiro e que foram importantes para mim ao longo desses anos. Agradeço também, de coração, a Kiara Cecília e Elisa Cardoso, grandes amigas também de geologia e de farra, mas também de muita paciência e afeto. Um agradecimento mais do que único para Jean Carvalho Toledo, o maior amigo que fiz nessa vida. Estendo esse agradecimento aos seus pais Vitor e Rosângela, pessoas maravilhosas que me acolheram.

Por fim, agradeço aos ativista pela democratização do conhecimento científico Alexandra Asanovna Elbakyan, criadora do *Sci-hub*. Sua luta é viva em toda a minha graduação.

RESUMO

Atualmente existem muitos estudos sobre estratigrafia de sequências em bacias continentais, no entanto, estudos de alta frequência são incomuns neste tipo de bacia. A definição de ciclos de mais alta frequência (4ª, 5ª ou até 6ª ordem) em estratigrafia é importante para a delimitação das heterogeneidades internas das rochas. Isto implica diretamente na qualidade e produção de reservatórios de hidrocarbonetos, por exemplo. Para a análise estratigráfica em alta resolução é importante levar em conta que o padrão de empilhamento dos depósitos sedimentares será marcado por sequências cíclicas limitadas por superfícies chaves (e.g. Superfície de Regressão Máxima). Desta forma, os ciclos de alta frequência devem mostrar a mesma tendência encontrada em análises estratigráficas de menor resolução (e.g. 3ª ordem). Assim, este trabalho descreve fácies, associação de fácies e ciclos progradacionais e retrogradacionais de depósitos pré-cambrianos, mais especificamente na formação Serra dos Lanceiros na porção ocidental da Bacia do Camaquã (Caçapava do Sul/RS). A partir da aquisição de dados faciológicos de afloramentos, identificação, descrição e interpretação do padrão de empilhamento - seguindo a premissa da estratigrafia de sequências de alta frequência - busca-se correlacionar e compreender a natureza dos ciclos pro- e retrogradacionais (P e R). Os resultados deste trabalho compõem mais de 100 metros de rocha em seção vertical, 4 associações de fácies associadas a ambientes deposicionais distintos, são elas: Associação de Fácies de Prodelta , de Frente Deltaica Distal, de Frente Deltaica Proximal e de Canais Distributários . Os ciclos estratigráficos identificados foram divididos em 5 ordens distintas (2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordens). O ciclo de 2ª ordem compreende toda sucessão levantada, representando a progradação dos ambientes deposicionais identificados, com influência principal de esforços tectônicos relacionados ao soerguimento do Alto de Caçapava do Sul. Os ciclos de 3ª ordem foram traçados pelas tendências principais de *coarsening-upward* e *fining-upward* das seções que são influenciados por mudanças climáticas de longo prazo. Os ciclos de 4ª ordem marcam o limite entre a influência dos fatores autocíclicos e alocíclicos gerados pela dinâmica interna dos ambientes deposicionais influenciados por tendências climáticas. Os ciclos de 5ª e 6ª ordens são autocíclicos e marcados pelas tendências internas dos pacotes rochosos ou internamente aos pacotes. Nesta escala estratigráfica a discussão possível é sobre aporte sedimentar e velocidade de fluxo, segundo os preceitos da lei de Stokes. O

modelo deposicional baseia-se na comparação com modelos deposicionais propostos para deltas influenciados por rio, considerando as peculiaridades da sedimentação pré-cambriana. O sistema deltaico marcou o avanço do sistema fluvial entrelaçado típico do Pré-cambriano sobre o sistema lacustre, passando pelas fases de prodelta, com avanço da frente deltaica e estabilização de canais distributários com estilo de fluvial entrelaçado. Os dados levantados deste trabalho precisam de mais levantamentos de dados na área para a validação destes resultados, mais seções laterais para definir a mapeabilidade dos ciclos estratigráficos e o melhor entendimento do dinamismo deste ambiente deltaico.

Palavras-Chaves: Arquitetura Estratigráfica – Estratigrafia de Sequências – Bacias Neoproterozóicas – Bacia do Camaquã – Serra dos Lanceiros – Alta Resolução

ABSTRACT

Today, there are many researches about sequence stratigraphy applied on continental basins. However, high-resolution studies are uncommon on these basins. The definition of high-frequency cycles (4th, 5th, or 6th orders) in stratigraphy is important for the delimitations of rock's internal heterogeneities. The implication is directly related to the quality of the reservoir and its hydrocarbon production, for example. For a high resolution analysis it is important to take into account that the stacking patterns are characterized by cyclic succession bounded by stratigraphic key surfaces (e.g. Maximum Flooding Surface). Thus, the high-resolution cycles may show the same trend found in minor resolution analyses (e.g. 3rd order). So, this dissertation describes facies, facies associations, and progradational and retrogradational cycles for pre-Cambrian deposits of Serra dos Lanceiros formation, on the occidental Camaquã basin (Caçapava do Sul/RS). Based on faciological data acquisition of outcrops, identification, description, and stacking patterns interpretation following high-resolution sequence stratigraphy basic assumptions – this study aims to correlate facies associations nature that composes the pro and retrogradational (P & R) cycles. The results of this work comprise 100 meters of rock in vertical section, and 4 facies associations associated with different depositional environments, like Facies Association of Prodelta, Frente Deltaica Distal, Frente Deltaica Proximal (and of Distributional Channels). The stratigraphic cycles identified were divided into 5 different orders (2nd, 3rd, 4th, 5th, and 6th orders). The 2nd order cycle comprises every succession established, representing the progression of the depositional environments identified, with the main influence of tectonic efforts related to the uplift of Caçapava do Sul High. The 3rd order cycles were traced by the main trends of coarsening-upward and fining-upward of the sections that are influenced by long-term climate changes. The 4th order cycles mark the limit between the influence of autocyclic factors and allocyclic generated by the internal dynamics of depositional environments influenced by climatic trends. 5th and 6th order cycles are autocyclic and marked by the internal tendencies of the rocky packages or internally to the packages. On this stratigraphic scale, the possible discussion is about sediment input and flow velocity, according to the precepts of Stokes' law. The depositional model is based on the comparison with depositional models proposed for river-influenced deltas, considering the peculiarities of Precambrian sedimentation. The deltaic system marked the advance of the typical

Precambrian interlaced fluvial system over the lacustrine system, passing through the prodelta phases, with the advancement of the delta front and stabilization of distributive channels with braided fluvial style. The data collected from this work need more data surveys in the area for the validation of these results.

Keywords: Stratigraphic Architecture – Sequence Stratigraphy – Neoproterozoic Basins – Camaquã Basin – Serra dos Lanceiros – High Resolution

“Um fracassado vencerá um gênio, com trabalho duro!”

Rock Lee

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

MAPA 1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.	21
MAPA 2: MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO.....	23
FIGURA 1: COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA DO GRUPO SANTA BÁRBARA NA BACIA DO CAMAQUÃ OCIDENTAL	25
QUADRO 1: PRINCÍPIOS DA ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS EM SISTEMAS FLUVIAIS.....	28
FIGURA 2: ARQUITETURA ESTRATIGRÁFICA DOS TRATOS DE SISTEMAS EM DEPÓSITOS FLUVIAIS EM CONDIÇÕES DOWNSTREAM.....	30
QUADRO 2: QUADRO DAS DIFERENTES DIVISÕES ESTRATIGRÁFICAS DO GRUPO SANTA BÁRBARA.....	35
FIGURA 3: MODELO DE FICHA DE LEVANTAMENTO DE PERFIS COLUNARES	38
FIGURA 4: BLOCO DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A MIGRAÇÃO DE BARRAS DE RIOS ENTRELAÇADOS E OS INDICADORES DE PALEOCORRENTES.	39
FIGURA 5: ESCALA ESPACIAL DAS DIFERENÇAS ORDENS ESTRATIGRÁFICAS	40
QUADRO 3: QUADRO DAS FÁCIES E SUAS DESCRIÇÕES E INTERPRETAÇÕES.	43
QUADRO DE FOTOS 1: FÁCIES SEDIMENTARES ENCONTRADAS NA ÁREA DE ESTUDO.	44
FOTOGRAFIA 1: DETALHE DA COMPOSIÇÃO	45
QUADRO DE FOTOS 2: ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE PRODELTA.....	47
QUADRO DE FOTOS 3: ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE FRENTE DELTAICA DISTAL.	49
QUADRO DE FOTOS 4: ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE FRENTE DELTAICA PROXIMAL	52
QUADRO DE FOTOS 5: ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE CANAIS DISTRIBUTÁRIOS.....	54
FIGURA 6: DIAGRAMA DE ROSETA DAS PALEOCORRENTES MEDIDAS EM CAMPO.....	55
FIGURA 7: SEÇÕES PLOTADAS EM FOTO DE SATÉLITE.	57
FIGURA 8: SEÇÕES TCM 1 E TCM 2 E SUAS INTERPRETAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS.	58

FIGURA 9: CICLOS ESTRATIGRÁFICOS VISTOS EM IMAGENS DE SATÉLITE E FOTOMOSAICOS.....	59
FIGURA 10: SEÇÕES IDEAIS	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ES Estratigrafia de Sequências

Fm Formação

BC Bacia do Camaquã

O&G Óleo e Gás

P-R Progradacionais e Retrogradacionais

P Progradacional(is)

R Retrogradacional(is)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVOS GERAIS	19
3. JUSTIFICATIVA	20
4. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO	20
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
5.1. TEORIA DOS MÉTODOS E TÉCNICAS.....	26
5.1.1. SEDIMENTAÇÃO NO PRÉ-CAMBRIANO.....	31
5.2. TRABALHOS ANTERIORES APLICADOS.....	32
6. MATERIAIS E MÉTODOS	35
6.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
6.2. SENSORIAMENTO REMOTO POR IMAGENS DE SATÉLITES	36
6.3. ANÁLISE DE FÁCIES.....	36
6.4. LEVANTAMENTO DE PERFIS COLUNARES.....	37
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
7.1. FÁCIES LITOLÓGICAS.....	41
7.2. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES	45
7.2.1. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE PRODELTA	45
7.2.2. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE FRENTE DELTAICA DISTAL	48
7.2.3. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE FRENTE DELTAICA PROXIMAL	50
7.2.4. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE CANAIS FLUVIAIS DISTRIBUTÁRIOS	53
7.3. PALEOCORRENTES.....	55
7.4. ARQUITETURA ESTRATIGRÁFICA.....	56
7.4.1. CICLOS ESTRATIGRÁFICOS ALOCÍCLICOS (3ª E 4ª ORDENS).....	59
7.4.1.1. 3ª Ordem.....	59
7.4.1.2. 4ª Ordem.....	60
7.4.2. CICLOS SEDIMENTOLÓGICOS (5ª E 6ª ORDENS)	61
7.4.2.1. 5ª Ordem.....	61
7.4.2.2. 6ª ordem.....	62
7.4.3. CONTROLES ALÓCTONES E AUTÓCTONES NA CONFIGURAÇÃO ESTRATIGRÁFICA..	63
7.5. MODELO DEPOSICIONAL	65

8. CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A	74
SEÇÃO TCM 1.....	74
SEÇÃO TCM 1 C	75
SEÇÃO TCM B	76
SEÇÃO TCM 1 D	77
SEÇÃO TCM 2 A	77
SEÇÃO TCM 2 B	78

1. INTRODUÇÃO

A Estratigrafia de Sequências (ES) é um método de análise estratigráfica que vem sendo cada vez mais empregado nos últimos 30 anos. Seu desenvolvimento e uso inicial ocorreu devido à necessidade da indústria de exploração e produção de petróleo de conhecer melhor as bacias produtoras, uma vez que, as abordagens estratigráficas convencionais (e.g. litoestratigrafia) não correlacionam temporalmente os eventos deposicionais. Atualmente, o uso da ES não se resume apenas à indústria do óleo e gás. Mineradoras que exploram depósitos minerais em rochas sedimentares (e.g. depósitos de bauxita), além da sua vasta aplicação acadêmica, nos estudos relacionados à análise de bacias são outros exemplos de aplicação deste método (Catuneanu, 2006).

Por outro lado, o modelo utilizado para conceber a metodologia da estratigrafia de sequências, assim como os padrões e nomenclaturas mais conhecidos, foram concebidos para bacias de margens passivas (e.g. Bacia de Santos) sendo o uso em outros tipos de bacias mais limitado e carente de estudos. Entretanto, em bacias continentais, com registros fluviais e de *fan deltas* há diversos estudos (e. g. Wright e Marriott, 1993; Shanley e McCabe, 1994) relacionando os padrões de empilhamento, associação e ciclicidades das fácies com o aumento ou diminuição do espaço de acomodação destes depósitos proximais.

Em suas diversas escalas de aplicação, a ES pode ser usada para analisar diversos eventos de preenchimento de bacias e os processos que exerceram maior influência na criação do espaço de acomodação da bacia. Os ciclos estratigráficos de eventos deposicionais relacionados a eventos tectônicos são aqueles relacionados aos padrões de empilhamento de escala regional que definem o mais alto ranking hierárquico dos estudos da estratigrafia de sequências. As respostas estratigráficas relacionadas à mudanças climáticas, por sua vez, definem o mais baixo ranking hierárquico, e a sua influência no padrão de empilhamento manifesta-se em sequências de escala centimétricas a métricas, vista em afloramento e furos de sondagem, marcando o limite entre a influência dos fatores autóctones dos fatores alóctones no registro sedimentar. Estas são o mais baixo ranking da ES, porém, são de vital importância para o conhecimento da heterogeneidade das rochas sedimentares. Os estudos de sequências em pequena escala são chamadas de

estudos de ES em alta resolução ou alta frequência e será o foco deste trabalho (Catuneanu, 2019).

A litoformação Serra dos Lanceiros (Justo & Almeida, 2004) com idade deposicional próxima 562.5 ± 5.5 Ma (Oliveira *et al.* 2014) compreende predominantemente de arenitos imaturos com estratificação cruzada acanalada e conglomerados granosuportados. Composto majoritariamente por depósitos de dunas subaquosas de rios entrelaçados de paleocorrente predominantemente para o norte. (Frambini *et al.* 2006). Ela faz parte do Grupo Santa Bárbara (Fragoso César *et al.* 2003) do Supergrupo Camaquã. Apesar de estudos iniciais utilizando ES na Bacia do Camaquã Ocidental (e.g. Borba & Mizusaki, 2003) esta bacia carece de estudos de alta resolução. Desta forma, este estudo busca identificar a anatomia dos ciclos estratigráficos de alta frequência em uma região aflorante da Fm Serra dos Lanceiros, para determinar a anatomia dos ciclos progradaçãois e retrogradaçãois, traçar o limite da influência dos ciclos estratigráficos, marcados por progradações e retrogradações dos ciclos sedimentológicos, e caracterizados por estruturas deposicionais (Catuneanu, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Este trabalho busca classificar a anatomia de ciclos estratigráficos de alta frequência na localidade da Serra do Lanceiros, dentro da sub bacia Camaquã Ocidental, visando entender a variação no espaço de acomodação da mesma.

2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos destacam-se:

- i) Definição das fácies, associações de fácies, padrões de paleocorrentes e modelo deposicional de cada sistema deposicional;
- ii) Caracterização de ciclos sedimentares de alta frequência, a partir da definição de tendências de aumento e diminuição do aporte sedimentar;

iii) Entendimento dos fatores que controlam a deposição, acumulação e preservação destes depósitos.

Além disso, estima-se que o resultado deste trabalho venha ampliar a compreensão de um período pouco conhecido na evolução da Terra e também contribuir para o enriquecimento dos estudos da formação, já que esta carece de estudos de detalhe no que tange à estratigrafia de alta resolução.

3. JUSTIFICATIVA

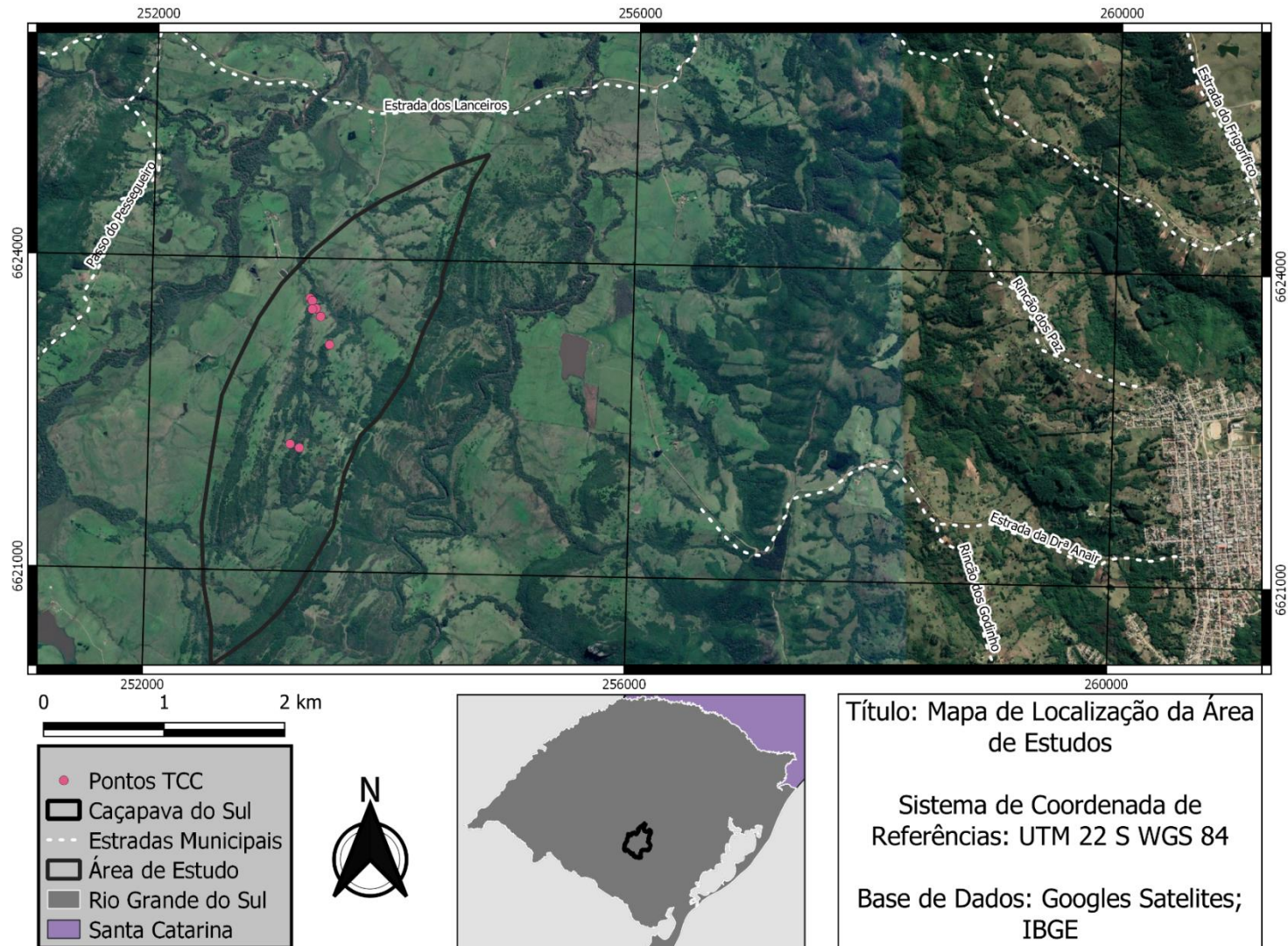
Este trabalho aumentará o acervo de conhecimentos acerca da Fm. Serra dos Lanceiros. A influência dos seus processos deposicionais controlados por fatores autóctones e alóctones ainda não está bem estabelecida. Desta forma, o presente trabalho contribuirá com o preenchimento desta lacuna.

Outro ponto em que este trabalho contribui é na compreensão dos processos deposicionais e suas ciclicidades em bacias Neoproterozóicas. Bacias Pré-cambrianas possuem menos exemplares e devido ao seu baixo potencial petrolífero, acabam sendo pouco estudadas. Neste estudo de alta frequência, o principal foco é buscar a distinção dos fatores autóctones e alóctones que influenciam neste tipo de bacia.

4. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudos localiza-se no município de Caçapava do Sul-RS, 8,5 km a oeste da área urbana e é limitado a leste pela Serra dos Lanceiros. Para acessar a área deve-se seguir pela estrada municipal dos Lanceiros sentido oeste até o sopé da Serra dos Lanceiros, onde localiza-se a área de estudos. Segundo os mapas geológicos encontrados em trabalhos como Almeida (2001 e 2004) e Fambrini *et al.* (2006) a área compreende a Fm. Serra dos Lanceiros do Grupo Santa Bárbara, Supergrupo Camaquã. O local é circundado a norte, oeste e a sul pela Fm Seival e a leste pela Fm. Serra dos Lanceiros (Mapa 1).

Mapa 1: Localização da área de estudo.



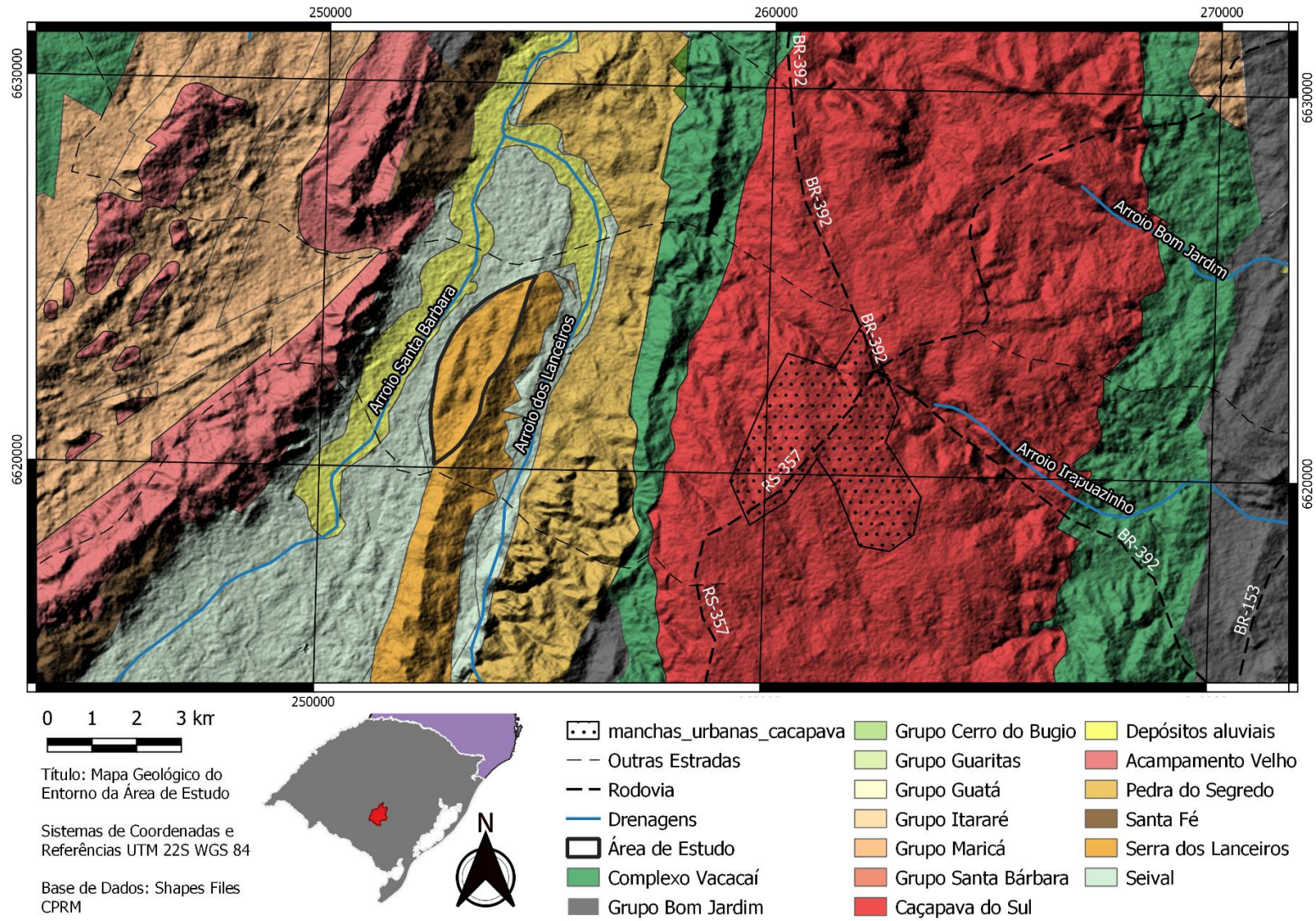
Fonte: Autor, Modificado de IBGE, 2021

A BC é um conjunto de 4 bacias com o mesmo lócus deposicional que se limitam em discordâncias angulares com eventos vulcânicos associados a cada unidade deposicional, com exceção da unidade mais basal (Paim *et al.* 2000) e é dividida em 4 Alogrupos (Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas) que correspondem aos Grupos homônimos de Fragoso-Cesar *et al.* (2003 apud Almeida 2004), os quais compõem o Supergrupo Camaquã (SGC).

Paim *et al.* (2014) salienta o carácter cada vez mais continental dos ambientes deposicionais da BC, relacionando cada alogrupo com seus respectivos estágios evolutivos. O Grupo Maricá, o mais basal do SGC, é interpretado como uma bacia de retroarco de antepaís relacionado ao estágio tardi-orogênico do Ciclo Brasileiro e compreende depósitos marinhos relacionados ao fechamento do paleo-oceno, na colisão dos microcontinentes *Rio de la Plata* e Encantadas e o fechamento do paleo-oceano Charrua. (Borba 2006, Philipp *et al.* 2016). O Grupo Bom Jardim é interpretado como depósitos lacustres profundos associados à unidade vulcânica da Fm Hilário, que compreende rochas andesíticas e tufos vulcânicos em um regime transpressivo. Os Grupos Santa Bárbara e Guaritas são interpretados como bacias tipo rifte, quando o Escudo Sul-riograndense já estava totalmente consolidado (Ediacarano - Ordoviciano), mostrando a continentalização da BC. O Grupo Santa Bárbara é associado com o vulcanismo Acampamento Velho e compreende depósitos de leques aluviais, lacustres e fluviais entrelaçados. O Alogrupo Guaritas é relacionado com o vulcanismo Rodeio Velho e compreende depósitos eólicos na base seguidos por depósitos fluviais. Borba *et al.* (2003b) interpreta estas duas unidades deposicionais como contemporâneas, divididas pelo soerguimento do Alto de Caçapava do Sul.

Para este trabalho, optou-se pela utilização pelas divisões litoestratigráficas de Fragoso-Cesar *et al.* (2003 **apud Almeida 2004**). A área de estudo deste trabalho compreende uma porção dos depósitos fluviais entrelaçados da Fm Serra dos Lanceiros, pertencentes ao Grupo Santa Bárbara (Alogrupo Santa Bárbara de Paim *et al.* 2000 e Fm Santa Bárbara de Borba e Mizusaki, 2003), na sub-bacia Camaquã Ocidental, a área tipo deste grupo. O Grupo possui contato basal com a Fm Acampamento Velho. Utilizando a classificação litoestratigráfica de Justo & Almeida (2004), este grupo é dividido, da base para o topo, nas litoformações Estância Santa Fé, Seival, Serra dos Lanceiros, Arroio Umbu e Pedra do Segredo.

Mapa 2: Mapa Geológico da área de estudo combinado com modelo digital de elevação.



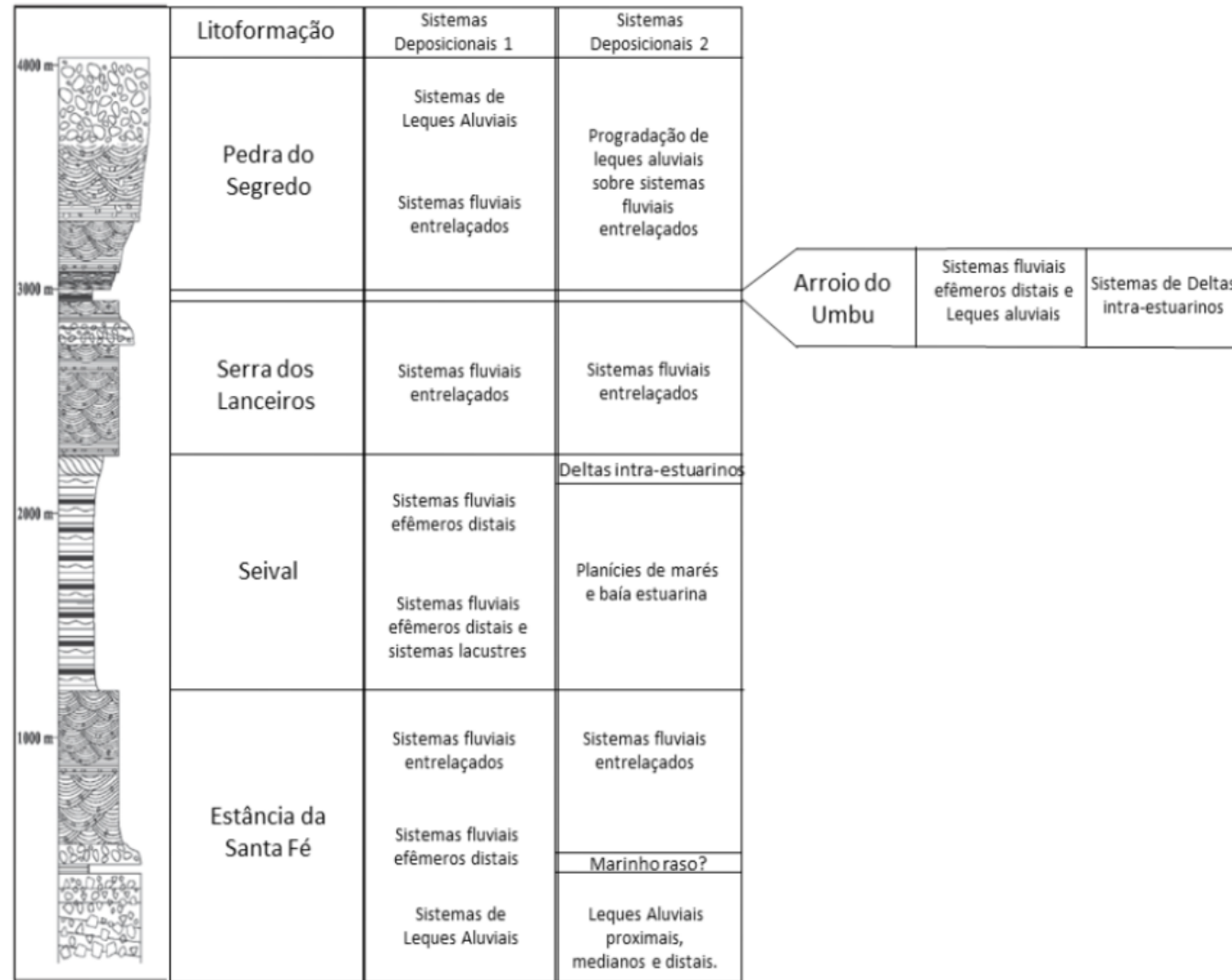
Fonte: Autor, modificado de CPRM 2020.

As formações mais basais do Grupo Santa Bárbara na sub bacia do Camaquã ocidental apresentam depósitos de leques aluviais e rios entrelaçados a oeste que correspondem a Fm. Estância da Santa Fé. Estes são sobrepostos por sistemas fluviais efêmeros distais que migram para sistemas lacustres (Almeida 2001 e 2004; Borba e Mizusaki 2003) ou depósitos interpretados como planícies de maré e baías estuarinas (Fambrini *et al.* 2006) correspondendo à Fm. Seival (Figura 1).

A Fm. Serra dos Lanceiros é descrita por Fambrini *et al.* (2006) e Almeida (2004) como depósitos fluviais entrelaçados, sendo formados por arenitos com estratificações cruzadas acanaladas, cruzadas tabulares e plano-paralelas, sendo interpretado por estes autores como dunas subaquosas superposta, com presença de ocasionais lentes conglomeráticas. Em suas camadas superiores é cada vez mais presente conglomerados de espessuras métricas a decamétricas. Almeida (2001 e 2004) discorre sobre como esta formação marca uma inversão no eixo axial da bacia, pois, ela passa a ter composição proveniente do embasamento metamórfico, exposto após o soerguimento do complexo granítico Caçapava do Sul (Bittencourt, 1983). Esta mudança composicional soma-se à mudança na paleocorrente, que na formação anterior estaria para sudeste, passando para norte (Almeida 2004).

Sobreposto à Fm. Serra do Lanceiros encontram-se depósitos semelhantes aos depósitos da Fm. Seival. Almeida (2004) interpreta esses depósitos como produtos de sistemas fluviais efêmeros distais associados com sistemas lacustres, enquanto que Fambrini (2006) interpreta como depósitos de deltas intra-estuarinos. Por fim, o Grupo Santa Bárbara, a Fm. Pedra do Segredo compreende depósitos de rios entrelaçados e leques aluviais próximos com proveniência do embasamento metamórfico e do granito Caçapava.

Figura 1: Coluna litoestratigráfica do Grupo Santa Bárbara na Bacia do Camaquã Ocidental



Fonte: modificado de Almeida 2004 (Sistema Depositional 1) e Fambrini et al. 2006 (Sistema Depositional 2)

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Teoria dos Métodos e Técnicas

A estratigrafia de sequências. é um método de análise acerca do preenchimento de bacias sedimentares que vem sendo cada vez mais empregado nas últimas décadas. Sua aplicação e desenvolvimento foi impulsionada pela exploração de petróleo. Sua importância na geologia sedimentar advém do seu caráter multidisciplinar, pois a ES combina conhecimentos das áreas de sedimentologia, estratigrafia clássica (e.g. litoestratigrafia, bioestratigrafia), geofísica (e.g. sísmica de reflexão e GPR), geomorfologia, geoquímica de isótopos e análise de bacias. Todas estas áreas contribuem para o entendimento dos depósitos sedimentares de forma cronológica, isto é, relacionando diferentes pacotes sedimentares dentro de uma mesma sequência deposicional. (Catuneanu, 2006)

A ES se diferencia das demais subdivisões da estratigrafia por considerar em sua análise as respostas à mudança do nível de base dos componentes sedimentológicos que influenciam o processo de formação das fácies sedimentares. Através da combinação de dados de afloramento, furos de sondagem, logs petrofísicos, dados de sísmica (ou GPR) e análise de análogos, com a consideração de fatores alóctones (e.g. subsidência ou soerguimento, fisiografia da bacia, mudança do nível de base) com fatores autóctones (condições climáticas, aporte sedimentar, energia do fluxo de transporte). São determinadas superfícies estratigráficas, isto é, superfícies que limitam padrões ou tendências deposicionais como, por exemplo, a superfície de inundação máxima que divide um padrão retrogradacional (diminuição da granulometria) de um padrão progradacional (aumento da granulometria), e tratos de sistemas, como por exemplo, tratos transgressivos e tratos de mar alto. Desta forma, ela ajuda na explicação de questões como ciclicidade das fácies, associação de fácies e suas relações internas, assim como na compartimentalização de reservatórios. (Catuneanu, 2006)

Outro ponto a ser considerado é que a estratigrafia de sequência pode ser aplicada em diferentes escalas hierárquicas, desde escalas regionais a escalas de afloramento. Estas distintas escalas estão relacionadas a diferentes eventos genéticos do registro sedimentar. Dividindo os diferentes fatores pelo tempo de

ciclicidade, padronizou-se os graus hierárquicos em 5 ordens distintas. Cada ordem de análise possui o seu grau hierárquico e possui os seus elementos construtores da trama da ES, suas sequências e suas componentes: tratos de sistemas e sistemas deposicionais. As escalas de alto grau hierárquico são aquelas analisadas em estudos estratigráficos de baixa resolução, correspondendo aos ciclos estratigráficos de 1ª, 2ª e até 3ª (limite da análise sismoestratigráfica). Estas escalas de análises estão relacionadas a eventos tectônicos, eustáticos e climáticos de maior periodicidade (e. g. separação e amalgamação de placas continentais) e são mais comumente interpretados como a abertura e evolução fisiográfica das bacias, portanto, sendo controlados por fatores alóctones. Os eventos de menor periodicidade, logo, menor hierarquia e de alta resolução, os chamados ciclos estratigráficos de 4ª e 5ª ordens, (escala sub sísmica) estão relacionados a glaciações ocasionadas por fenômenos astronômicos (e. g. ciclo de Milankovitch), e suas variações no registro são interpretadas mais comumente como consequências de fatores autóctones. É importante deixar claro que cada grau hierárquico da ES corresponde, além de uma diferente escala de tempo, corresponde a uma diferente escala de comprimento. Ciclos de 1ª ordem ocorrem na escala de $10^5 - 10^8$ anos e a $10^2 - 10^4$ m e nelas são subdivididas as mega sequências. Ciclos de 2ª ordem $10^5 - 10^7$ anos e a $10^2 - 10^3$ m e nelas são subdivididas as super sequências. Ciclos de 3ª ordem $10^4 - 10^6$ anos e a $10^1 - 10^2$ m e nelas são subdivididas as sequências. Ciclos de 4ª ordem $10^2 - 10^5$ anos e a $10^0 - 10^1$ m e nelas são subdivididas as parasequências. Ciclos de 5ª ordem $10^1 - 10^2$ anos e a $10^0 - 10^1$ m e geralmente são relacionados a ciclos sedimentológicos. (Zecchin & Catuneanu, 2013; Catuneanu 2019)

Sendo o foco deste trabalho determinar os ciclos estratigráficos de maior resolução, optou-se por usar a metodologia apresentada por Magalhães *et al.* (2020), que determina os seguintes critérios para se determinar os ciclos estratigráficos de alta frequência:

- 1) Padrão de empilhamento: Observar-se um padrão interno Transgressivo-Regressivo (neste trabalho será adotado Progradante-Retrogradante (P-R)). Sendo que o arranjo entre os ciclos P-R não precisa ser simétrico e alguns dos pacotes (P-R) podem estar ausentes.

- 2) Recorrência da assinatura do padrão de empilhamento, relacionado à hierarquia em questão.

3) Tendências (distribuição não aleatória) no arranjo vertical do padrão de empilhamento que determinem sequências de alta frequência (parasequências) como a base para que se defina e construa os tratos de sistemas das sequências de alta ordem.

4) Mapeabilidade: O padrão de empilhamento precisa ser mapeável, assim como seus respectivos limites, superfícies estratigráficas na hierarquia considerada mesmo (mais provável) mudança lateral das fácies.

O modelo utilizado para conceber a metodologia da estratigrafia de sequência, assim como os padrões e nomenclaturas mais conhecidos, foram concebidos para bacias de margens passivas (e.g. Bacia de Santos) sendo o uso em outros tipos de bacias mais limitados. Contudo, existem modelos de aplicabilidade da ES em regimes fluviais e de leques aluviais. Em Catuneanu (2006), encontram-se os princípios da estratigrafia de sequência em ambientes fluviais, descritos por Miall (2002), resumidos no Quadro 1.

Quadro 1: Princípios da estratigrafia de sequências em Sistemas Fluviais.

1. Incisões Fluviais podem ocorrer durante períodos de queda do nível de base, aumento da descarga do fluxo ou redução do aporte sedimentar.
2. Agradações Fluviais podem ocorrer durante períodos de subida do nível de base, aumento do aporte sedimentar ou redução da descarga do fluxo.
3. As respostas fluviais às mudanças do nível de base são principalmente relacionadas ao tectonismo e flutuações eustáticas. As respostas fluviais a mudanças no aporte sedimentar e na descarga do fluxo são primeiramente relacionados a mudanças climáticas.
4. Sistemas fluviais pouco sinuosos, assim como sistemas de rios entrelaçados ou rios com barras alternadas são mais prováveis de ocorrerem durante períodos de baixa acomodação.
5. Sistemas fluviais anastomosados são comumente associados com altas taxas de subida do nível de base, como na transgressão.
6. Sistemas fluviais meandranes são comumente caracterizam períodos de baixa a moderada taxas de subida do nível de base.
7. Sistemas fluviais retilíneos que mostram pouca evidência de migração lateral são típicos de áreas de declive muito baixo e pouca acomodação.
8. Vales incisivos podem ser preenchidos por sistemas fluviais de qualquer tipo.
9. Evidências de influência marinha dentro de sistemas fluviais, assim como participação de marés, indicam episódios de inundação (acomodação em excesso de sedimentação).

Fonte: Modificado de Catuneanu (2006) Adaptado de Miall (2002).

Quando se analisa sistemas fluviais, isto é, longe da praia ou lago, os critérios para a aplicabilidade das premissas da ES precisam ser mais cautelosos. Os fatores alóctones que influenciam nos depósitos fluviais irão variar se este depósito estiver

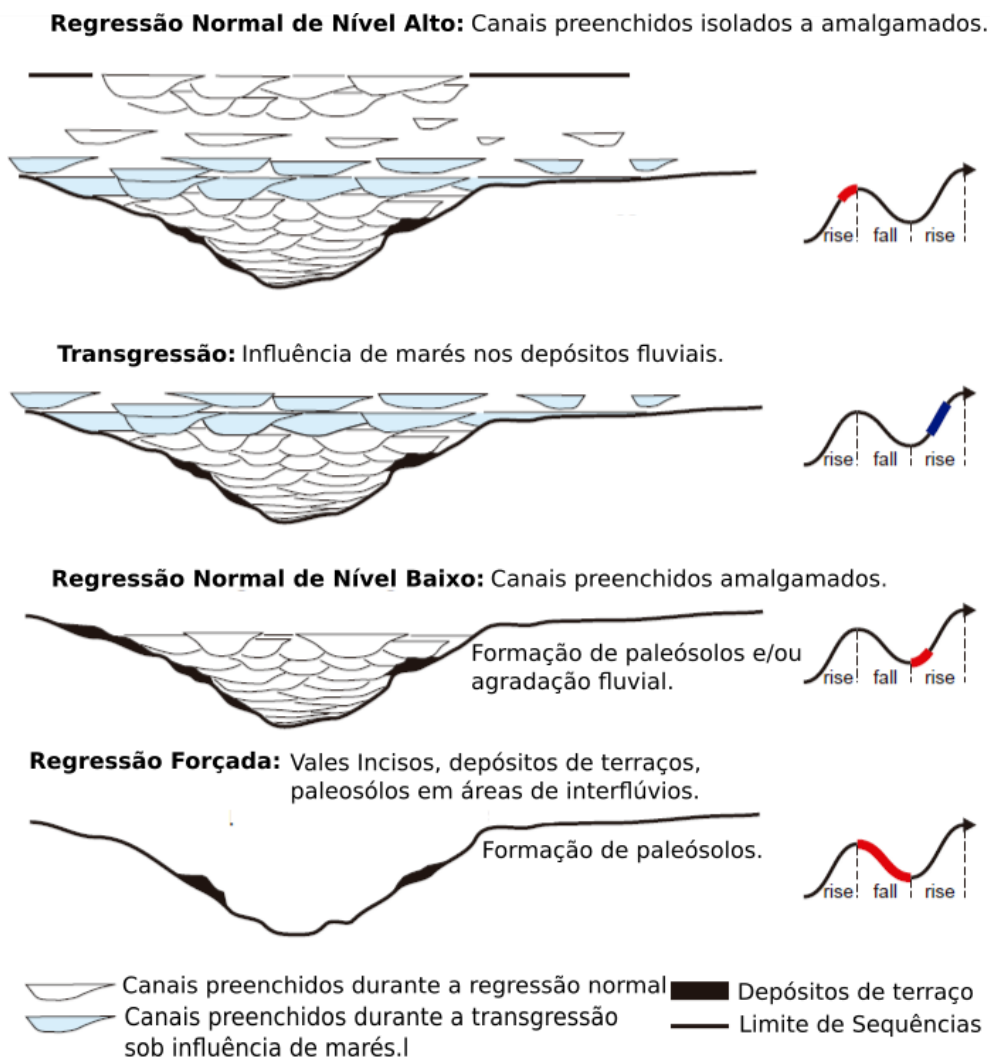
sob condições *upstream* (mais próximo da rocha fonte, sem influência da linha de costa) ou *downstream* (próximo à linha de costa). Em bacias mais continentais com depósitos fluviais e com ausência de depósitos marinhos, típicas condições de *upstream*, é necessário entender a influência dos fatores alóctones tectônicos (soerguimento da área fonte e subsidência da bacia) e mudanças climáticas, sendo que a mudança do nível de base não influenciará de forma significativa estes depósitos. Porém, se os depósitos fluviais estiverem perto o suficiente da linha de costa (*downstream*), os preceitos clássicos da ES podem ser aplicados mais facilmente pois este rio está sob influência da variação do nível de base. Neste caso, pode-se utilizar as nomenclaturas de trato de sistemas de nível baixo, transgressivo e nível alto. Enquanto que, no caso de *upstream*, utiliza-se as nomenclaturas tratos de sistemas de baixa e alta acomodação, baseada na relativa abundância de elementos arquiteturais de ambientes fluviais, devido à ausência da linha de costa. Tendo os trabalhos de Blum, (1994) e Posamentier, (2001) como exemplos observa-se que o limite entre os domínios *downstream* e *upstream* fica a na ordem de dezenas a centenas de quilômetros da linha de costa. (Catuneanu 2006)

Em sistemas fluviais próximos à linha de costa, isto é, em condições *downstream*, a análise estratigráfica busca a presença de depósitos de planícies de inundação, paleocanais e depósitos estuarinos. Em condições de regressão normal de nível baixo, os canais fluviais se acumularão de forma amalgamada, tendo ausência de depósitos de planícies de inundação. Quando o sistema está sob condição transgressiva, os canais passarão a ter mais espaço para se desenvolver, preservando as planícies de inundação e, agora, sob a influências de depósitos de maré. Quando encerra-se a transgressão e inicia-se a regressão normal de nível alto, encerra-se a influência da maré e os canais encontram-se isolado pelas planícies de inundação passando gradualmente para canais novamente amalgamados (Figura 2). Em condições de regressão forçada, os paleocanais são erodidos e se formam os vales incisos (Shanley e McCabe, 1993). É importante considerar que a taxa entre a presença de elementos arquiteturais de canais fluviais e de planícies de inundação, em momentos de acomodação positiva (criação de espaço de acomodação) depende diretamente da velocidade de subida do nível de base. Quando isto ocorre de forma rápida, isto leva à agradação das planícies de inundação, predominando depósitos de granulometria fina. Já lentas subidas do nível de base resultam em depósitos de canais amalgamados. Estes princípios estratigráficos, descritos neste parágrafos,

podem ser aplicados também a sistemas de *fan deltas*, pois são governados por processos similares (Catuneanu 2006).

Em sistemas fluviais que não possuem influência do nível de base, ou seja, aqueles sob regime *upstream*, os fatores alóctones que irão influenciar na configuração estratal dos depósitos são as mudanças climáticas, tectonismo da área fonte e subsidência da bacia. Estes sistemas *upstream* estão localizados próximos às áreas fontes, sendo fortemente influenciados pelas respostas aos esforços tectônicos que estas áreas sofrem. Porém, as respostas estratigráficas destes depósitos podem estar relacionadas a ciclos climáticos que sobrepõem ciclos tectônicos ou ao contrário. (Catuneanu 2006)

Figura 2: Arquitetura estratigráfica dos tratos de sistemas em depósitos fluviais em condições downstream.



Fonte: Catuneanu 2006 e Shanley e McCabe, 1993.

Mudanças climáticas vão interferir diretamente na descarga do rio e isso refletirá no aporte sedimentar do mesmo. Estas mudanças respondem primeiramente aos ciclos orbitais glaciais de Milankovitch que causam variações na energia solar absorvida pelo planeta em escalas de tempo entre 10.000 e 100.000 anos. Durante os períodos interglaciais (ou de deglaciação) o maior escoamento de água causa o aumento na descarga dos rios, aumentando o potencial erosivo do rio, criando incisões fluviais. Em períodos glaciais, o clima mais árido diminui o potencial de erosão dos rios, favorecendo a agradação dos depósitos fluviais. Sobre a glacioeustasia, quando ela é aumentada, (criação de espaço) há uma maior tendência de deposição do que de transporte, o contrário ocorre quando a glacioeustasia diminui (diminuição de espaço). Desta forma, os ciclos glaciais tendem a alterar os perfis de equilíbrios dos rios. (Catuneanu 2006)

Os ciclos tectônicos de maior frequência de subsidência e soergimento podem sobrepor à influência das mudanças climáticas, quando ocorrem em alta frequência, no desenvolvimento da ciclicidade dos depósitos fluviais. É importante ressaltar que bacias com lentas e rápidas taxas de subsidências terão diferenças nas arquiteturas dos depósitos fluviais, esta diferença de condição é denominada “configuração de baixa acomodação” e “configuração de alta acomodação” (não confundir com os tratos de sistema de alta e baixa acomodação). Tanto a configuração de alta e baixa acomodação podem abrigar os tratos de sistemas aqui já mencionados. Estas configurações são mais detectáveis em escalas de análise estratigráfica de baixa ordem (1, 2 e 3) relacionados aos estágios de abertura das bacias.

5.1.1. Sedimentação no Pré-cambriano.

É notório que a maioria dos modelos deposicionais e estratigráficos foram estabelecidos para bacias fanerozóicas. Nestes modelos são contemplados a influência da vegetação no registro geológico (e.g. bioturbações, fósseis, icnofósseis). Outro registro, porém indireto, é a influência que a biota (principalmente a vegetal) possui na estabilização e consequente preservação no registro de feições geológicas (e.g. dunas subaéreas estáveis devido à vegetação). Contudo, mais de 80% do tempo geológico não apresenta esta influência no registro. Desta forma, o Pré-cambriano (4,6 Ga - 541 Ma), mais especificamente o Neoproterozóico (1 Ga - 541 Ma), possui aspectos próprios no seu registro sedimentar que faz necessária a discussão para a

compreensão da análise estratigráfica deste trabalho (Eriksson *et al.* 1998 e 2001, Bose *et al.* 2012).

Os controles estratigráficos relacionados à altas hierarquias (Zechin 2013) em bacias pré-cambrianas mais jovens que 2,0 Ga são as mesmas das bacias fanerozóicas, que são tectônica, magmatismo, eustasia e clima (Eriksson *et al.* 2001). Catuneanu *et al.* (2012) argumentam que as diferenças entre bacias fanerozóicas e pré-cambrianas não são tão significativas para a mudança na abordagem do método da estratigrafia de sequências. As ponderações, no entanto, são principalmente no que diz respeito ao potencial de preservação e na quantidade de dados disponíveis para a análise correta.

A comparação entre ambientes deltaicos fanerozóicos e do Pré-cambriano, por sua vez, terá diferenças significativas. Apesar da tendência de frentes deltaicas com granocrescência ascendente e canais distributários de planícies deltaicas com granodecrescência ascendente se manterem até os deltas modernos, diferenças na granulometria são visíveis e esperadas (Eriksson *et al.* 1998 e 2001, Bose *et al.* 2012). Contudo, deltas antigos possuem textura mais imatura com predomínio de quartzarenitos ou arenitos arcoseanos com presença de litoclastos e granulometria mais grossa, (Bose *et al.* 2012). Outro aspecto diferente é o maior ângulo do declive na frente deltaica, sendo muito mais íngreme nos deltas sem vegetação. As planícies deltaicas são predominantemente de rios entrelaçados. Em geral, as taxas de subsidência são mais altas, assim como o gradiente topográfico contribuíram para um grande aporte de sedimentos e formação de deltas mais espessos que os atuais (Eriksson *et al.* 1998).

5.2. Trabalhos Anteriores Aplicados

O grupo Santa Bárbara compreende uma série de depósitos de leques aluviais e de rios entrelaçados de idade deposicional Neoproterozóica - Cambriana que abstêm de influência de vegetação durante a formação da bacia (Marconato *et al.* 2013).

A área de estudos carece de estudos de estratigrafia de alta frequência, tendo poucos estudos feitos com as bases da estratigrafia de sequência de baixa resolução. A seguir, serão apresentados alguns destes estudos.

Paim *et al.* (2014) aplicando os preceitos da alostratigrafia, definem as aloformações Acampamento Velho, Santa Fé (Superior e Inferior), Serra dos Lanceiros e Pedra do Segredo.

Fambrini (2003) define duas sequências deposicionais que compõem o Grupo Santa Bárbara Ocidental. A primeira sequência seria compreendida, em sua base por depósitos de leques aluviais e rios entrelaçados com paleocorrentes para sudeste em um contexto de trato de mar baixo. Seguido por um trato transgressivo que teria formado um estuário com predomínio de decantação, progradando para depósitos de planícies de maré e barras de submaré (equivalente aos depósitos da Fm. Seival). O trato de mar alto caracteriza-se por depósitos marinhos rasos progradantes com influência de um delta intra-estuarino. A segunda sequência inicia-se com o seu trato de mar baixo, após uma discordância erosiva. Nesta instalou-se uma planície aluvial de rios entrelaçados com paleocorrente para norte (Fm. Serra dos Lanceiros). Seguido pelo trato transgressivo que gerou novos depósitos estuarinos (Fm. Arroio do Umbu) concomitante ao soerguimento do alto de Caçapava do Sul (Almeida 2004) que aumentou as taxas de subsidência. O trato de mar alto compreende os depósitos progradacionais de rios entrelaçados que migram para leques aluviais de clastos graníticos (Fm. Pedra do Segredo).

Em sua tese de doutorado, Almeida (2004) descreve a ciclicidade dos depósitos de rios efêmeros distais para depósitos de rios efêmeros arenosos que gradam para depósitos areno-conglomeráticos, que compreende a transição das litoformações Seival - Serra dos Lanceiros. Este ciclo seria marcado por fácies com exposição subaérea desde o início das fases arenosas. O que indicaria, segundo o referido trabalho, um aumento na capacidade de transporte dos sistemas deposicionais fluviais entrelaçados que progradariam por cima dos sistemas mais distais do tipo aluvial efêmero. Ele interpreta ainda que as porções onde registram maior concentração de fácies de planícies de inundação (maior espaço de acomodação) seriam causadas por uma maior taxa de subsidência da bacia, ou menores taxas de aporte sedimentar, devido às condições *upstream* que foram discutidas anteriormente. Já as sucessões sedimentares areno-conglomeráticas indicariam menor taxa de subsidência ou clima mais úmido.

Borba e Mizusaki (2003) reconheceram 5 associações de fácies (AF) da chamada Fm Santa Bárbara (Grupo Santa Bárbara). São elas: AF rios entrelaçados cascalhosos, rios entrelaçados arenosos, lacustre, frente de fan delta e leques

aluviais. O mesmo trabalho divide a sub bacia Camaquã Ocidental em sequências de terceira ordem: As duas sequências basais (I e II) são compostas por associações de fácies de leques aluviais, deltas aluviais lacustres e canais fluviais entrelaçados (braided) de carga arenosa, todos com importante transporte axial no sentido nordeste e contribuição de leques aluviais laterais às bordas da bacia. Já a Sequência III, posicionada no topo do pacote, é formada por depósitos de canais entrelaçados cascalhosos, com características erosivas sobre as subunidades basais e paleocorrentes para sudoeste, refletindo inversão total do sentido de transporte axial da Bacia Camaquã Ocidental.

A sequência I está em contato discordante com as rochas vulcânicas da Fm. Acampamento Velho e da Fm. Hilário ou metassedimentares (Fm. Passo Feio). O trato de sistema de nível baixo é representado pela associação e fácies de leques aluviais localizados em toda margem oeste da bacia. A superfície que limita o Trato de Nível Baixo e o trato transgressivo não está bem definida. Este último é representado pelos depósitos de *fan deltas* e lacustres. A superfície de máxima inundação, que limita o trato transgressivo com o trato de nível alto é marcada por sedimentos finos depositados abaixo do limite de influência de ondas normais. O trato de nível alto compreende os depósitos fluviais que retrabalham os depósitos finos sotopostos, evidenciado pela presença de intraclastos.

A Sequência II começa com uma inconformidade com o trato inferior com depósitos arenosos de rios entrelaçados com paleocorrente apontando para o norte que representam o trato de nível baixo. O trato de sistema de nível alto é representado por depósitos de granulometria grossa de fandelta que depositaram em lagos rasos. O trato de sistema transgressivo e algumas porções do trato de nível alto foram erodidos pela incisões da próxima sequência.

A sequência III possui uma inconformidade na base, seguido por depósitos intraformacionais das sequências mais basais, associados com processos tectônicos, interpretados com rearranjo da bacia, evidenciando a inversão da bacia. São depósitos cascalhosos de rios entrelaçados e leques aluviais que estão preservados na borda leste da bacia, em contato com o com a Fm. Passo Feio.

Quadro 2: Quadro das diferentes divisões estratigráficas do Grupo Santa Bárbara

Paim et al. 2014	Fambrini 2003	Almeida 2004	Fambrini 2003	Borba e Mizusaki 2003*
Aloformação Serra do Segredo	Fm. Rincão dos Mouras (Membro Pedra do Segredo)	Fm. Pedra do Segredo	Sequência Santa Bárbara 2	Sequência III (553 ± 22 Ma)*
	Fm. Rincão dos Mouras (Membro Arroio Umbu)	Fm. Arroio do Umbu		
Aloformação Serra dos Lanceiros	Fm. Rincão dos Mouras (Membro Serra dos Lanceiros)	Fm. Serra dos Lanceiros	Sequência Santa Bárbara 1	Sequência II (562.5 ± 5.5 Ma)*
Aloformação Santa Fé Superior	Fm. Seival	Fm. Seival		
Aloformação Santa Fé Inferior	Fm. Estância de Santa Fé	Fm. Estância da Santa Fé		Sequência I (567.9 ± 5.9 Ma)*

Fonte: modificado de Paim et. al 2014; Fambrini 2003; Borba e Mizusaki 2003 e Almeida 2004, *Oliveira et al. 2014.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados neste trabalho estão descritos nos subcapítulos a seguir.

6.1. Revisão Bibliográfica

Este trabalho foi, por um todo, calcado na revisão bibliográfica de artigos e livros já publicados sobre a área de estudo, sobre a estratigrafia de sequência e sobre bacias similares a que está sendo estudada. Primeiramente, foi realizado um estudo sobre todos os trabalhos realizados dentro da área de estudo para a compreensão das diferentes interpretações e discussões já feitas sobre aquele alvo. Posteriormente

foi refeito um estudo sobre o estado da arte da estratigrafia de sequências para a sua aplicação plena no local escolhido.

6.2. Sensoriamento Remoto por Imagens de Satélites

O sensoriamento remoto é um conjunto de técnicas que permite o estudo de áreas de forma remota, isto é, sem obtenção de dados presencialmente no local. Esta técnica utiliza a combinação de quatro elementos essenciais e indissociáveis: a fonte, a radiação eletromagnética (REM), o sensor e o alvo. A fonte (geralmente o Sol) emite REM no alvo exploratório que absorve parte da radiação e reflete outra parte, esta parte refletida é captada pelo sensor.

Diversos satélites foram lançados à órbita terrestre, desde o século XX, para o imageamento da superfície do planeta Terra. Os dados captados pelos satélites possuem diversos aspectos que dependem da interação entre os elementos supracitados, entretanto, geralmente o sensor possui maior relevância, pois, o seu grau tecnológico pode interferir em parâmetros mais cruciais para este trabalho, como a resolução espacial e a resolução espectral.

Para este trabalho, foi utilizado o software Qgis v.3.10.14; foram criadas imagens e mapas da área de estudos a partir do banco de dados *Google Satellites*, que integram diversas imagens de satélite de diversos satélites diferentes. Foi utilizada também uma imagem do satélite Alos Palsar para a construção de modelos digitais de terreno e arquivos de imagens vetoriais para a construção de mapas temáticos.

6.3. Análise de Fácies

A análise de fácies sedimentares consiste em dividir as diferentes partes de uma rocha sedimentar segundo, primeiramente, a granulometria modal e as estruturas deposicionais e características como grau de seleção, grau de arredondamento e esfericidade, assim como composição mineralógica, espessura das camadas, conteúdo fossilífero. Consiste, também, neste método, a associação de fácies (fácies geneticamente interligadas) e a sucessão de fácies (análise vertical da sucessão das fácies) (James & Dalrymple 2010).

É o objetivo da análise de fácies a interpretação dos processos genéticos deposicionais e posteriormente a dedução do ambiente deposicional mais provável.

Neste trabalho este método foi utilizado para distinguir e caracterizar as fácies sedimentares além de determinar as associações entre elas.

6.4. Levantamento de Perfis Colunares

A representação da sucessão vertical de fácies pode ser feita em campo em uma folha de papel específica (Figura 3) e consiste em um eixo horizontal que indica o tamanho de grão dominante da rocha e um eixo vertical que representa, em uma determinada escala, a espessura de cada camada. Esta técnica permite a representação gráfica da sucessão vertical de fácies, além disso, permite o registro de informações como direção e inclinação do mergulho, estruturas deposicionais e tectônicas, assim como, anotações acerca de fotos e amostras.

Para este trabalho foi utilizada a escala 1:50 centímetros para que fossem representados os ciclos de 4ª e 5ª ordem. Além das fichas de preenchimento, foi utilizado uma trena e uma vara de Jacob para a medição com maior acurácia da espessura das camadas.

Na etapa pós-campo foi utilizado o software Adobe Illustrator CS6 para a digitalização dos perfis colunares levantados no campo, assim como para o desenho das feições interpretativas destes dados.

Figura 3: Modelo de Ficha de Levantamento de Perfis Colunares;

GRUPO/INTEGRANTES:		TESTEMUNHO: TCM-01-B		
ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS HIDRODINÂMICOS OU DEFORMACIONAIS M Maciço E Cruzada Planar Fluidização Lam. Plano Paralela E Cruz. Tangencial Lam. Convoluta Lam. Cruz. de ripples E Cruz. Acanalada Escorregamento Ripples assimétricas Lam. Ondulada Truncada Ripples simétricas Estrutura de Carga E.Cruz. Baixo Ângulo Estrutura em Chama		ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS EÓLICOS Estratificação horizontal Estratificação cruzada de baixo ângulo Estratificação cruzada planar Estratificação cruzada tangencial Estratificação cruzada acanalada Estruturas de adesão		Intervalo: Coord. UTM E: 293766 N: 6623518 Data: 2/01/2020 Escala:
DESCRIÇÃO LITOLÓGICA				
Área BI SX G ⁺ Mg G M F MI ⁺ S Ag 	Cód. Fácies Paleocorrente Estruturas Fotos Amostras Assoc. de Fácies	<p>Exco do St: 115/25 St. 155/22</p> <p>Am. fac: Intimamente, as sts apressam gra. normal; de SX a Am nas bancadas inferiores, até blocos nas superiores (12cm a areia grossa).</p> <p>20cm ST</p> <p>Am. fac: Sl/Sn intercoladas (< 5cm) lam Sl < 1cm. Guardam p. St de SX na base das sts (< 7cm). St Estria: Grande (15-30cm). Formando camadas lobuladas, amalg.</p> <p>15' ... SX = ...</p> <p>2 CICLOS PRO (LATERALMENTE) INT. < 1m SUR ± 1,4m. MARCADOS POR ESTRATO (ST) GRÃO (Am-Nd) CRESCÊNCIA. SET'S 10 a 30cm SX < 11cm SUB-ANG A SUB-ARREDOND.</p> <p>Sl: BOM SELEC, INTERCALADO ARG., mica 20%, FERRUGINADO (laterita?), qzto sub ana/ALTA ESF. FELDS - LAVIMENTADO.</p> <p>6m ENCOBERTO</p> <p>St: Am. Grossa c/ sts granulos disp. mal relic. Os sts tendem a se conectar na base das sts. sts 15-30cm. Clastos: granitos, xisto, quartzitos.</p> <p>Sl: Baixa selar, med. org, quartzos, muscovita, mica, etc 10cm</p> <p>< SX: Baixa rif sel ang</p>		
Página 13				

Fonte: Autor 2020

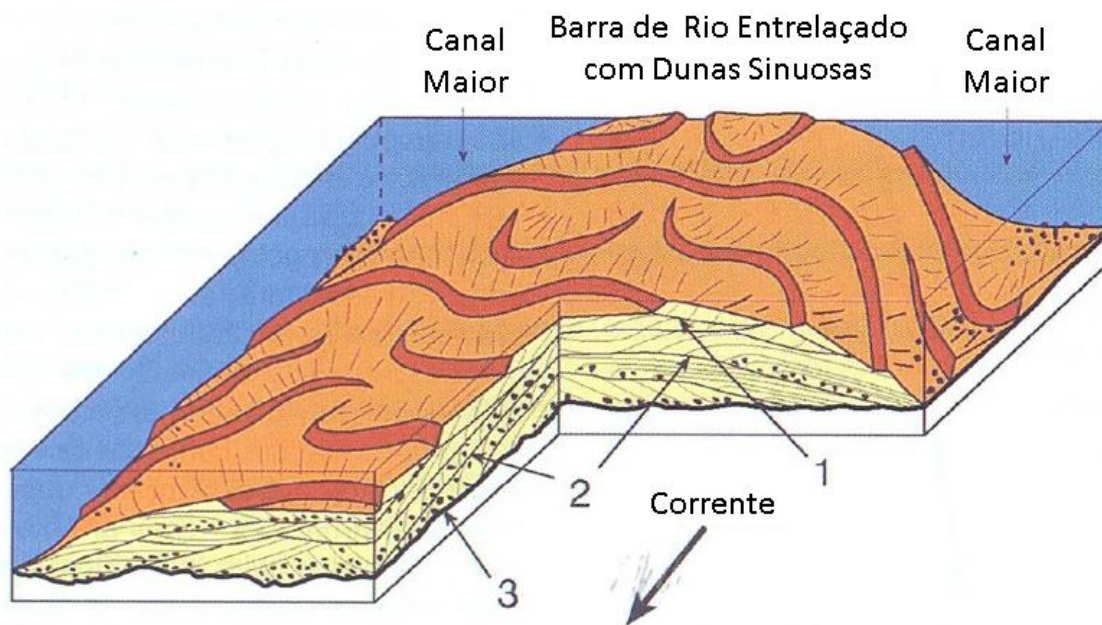
6.5. Análise de Paleocorrentes

As estruturas sedimentares deposicionais vistas em campo foram utilizadas para medir as paleocorrentes, seguindo a premissa de Potter & Pettijohn (1977) que

afirma que estruturas direcionais internas e a forma do corpo de depósitos sedimentares são uma resposta conjunta à direção do fluxo de transporte dos sedimentos. Selley (1968), a análise de paleocorrente segue 4 estágios:

1. Coleta em campo de dados de afloramentos, como, por exemplo, direção azimutal do mergulho de estruturas cruzadas acanaladas.
2. Dedução da direção do movimento da paleocorrente.
3. Preparação de um mapa regional de paleocorrentes
4. Dedução da inclinação deposicional, usando os resultados das paleocorrentes juntamente com as mudanças de fácies regionais.

Figura 4: Bloco diagrama esquemático mostrando a migração de barras de rios entrelaçados e os indicadores de paleocorrentes.



Fonte: Modificado de Dalrymple (2010)

Na etapa de Campo, será utilizada uma bússola tipo brunton para a medição das paleocorrentes.

Após a etapa de pós-campo, será utilizado o software Stereonet 32 para a correção das paleocorrentes e o Stereonet v10.4 para a plotagem destas paleocorrentes em um estereograma que possibilitou a análise dos paleofluxos.

6.6. Análise Estratigráfica

Os preceitos da estratigrafia de seqüências já foram discutidos nos capítulos anteriores deste trabalho. Desta forma, aqui será apresentado um breve sumário em tópicos dos passos adotados para a identificação dos ciclos P-R.

1. Levantamento dos perfis colunares com as respectivas fácies, espessuras, descrição e configurações internas de cada camada em escala de 1:50 centímetros.
2. Observar as tendências P-R e determinar as superfícies estratigráficas, tratos de sistemas e seqüências.
3. Mapear lateralmente as seqüências e superfícies determinadas.
4. Verificar a diferença entre as feições que são mapeáveis e as que são pontuais, para, definir a influência dos ciclos estratigráficos e sedimentológicos.
5. Conceber um modelo deposicional para cada seqüência encontrada.

Para as etapas em campo, serão utilizados os mesmos materiais descritos nos métodos acima. Para as etapas pós-campo, será utilizado o software *Excel 2013* para a organização dos dados de forma sistemática.

Figura 5: Escala Espacial das Diferenças Ordens Estratigráficas

1ª Ordem	Preenchimento de Bacia em uma Configuração Geotectônica Particular/Tipo de Bacia	
2ª Ordem	600-1200 m	Mudança no Padrão de Empilhamento Estratigráfico na Escala 10 ³ m
3ª Ordem	400-1000 m	Mudança no Padrão de Empilhamento Estratigráfico na Escala 10 ² m
4ª Ordem	40-80 m	Mudança no Padrão de Empilhamento Estratigráfico na Escala 10 ¹ m
5ª Ordem	1,5 - 15 m	Mudança no Padrão de Empilhamento Estratigráfico na Escala 1 m

Fonte: Catuneanu 2019

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os trabalhos de campo foram realizados em 3 dias no mês de Janeiro do ano de 2020. Estes 3 primeiros dias deveriam ter feito parte de uma primeira etapa de reconhecimento da área de estudo onde as primeiras seções verticais e demais coletas de dados seriam feitas. Esta etapa seria sucedida por novas etapas de campo para o levantamento de novas seções colunares com correlação lateral às anteriormente levantadas. Contudo, devido à pandemia global do vírus Sars-Cov-19 que iniciou-se em março de 2020 e até a data de apresentação deste trabalho ainda não teve seu fim, as etapas de revisitação à área de estudo não puderam ser realizadas. Desta forma, o trabalho foi feito apenas com os dados dos levantamentos iniciais.

Ao todo foram levantados 108,25 metros de seções colunares em um perfil vertical total de 360,5 metros. Esta diferença é devido ao grande número de intervalos encobertos por solo onde não foi possível determinar as litologias escondidas. Este levantamento foi feito em duas seções verticais principais, chamadas TCM 1 e TCM 2. A TCM 1, devido aos grandes intervalos encobertos entre as exposições rochosas, foi subdividida em em 3 seções, são elas TCM 1 A, TCM 1 B e TCM 1 C. Estas 3 seções se sucedem verticalmente ao longo de 284 metros. Entre a primeira e a segunda, 36,6 metros de material encoberto as divide e entre a segunda e terceira 164, 25 metros de encoberto. A TCM 2 possui poucos intervalos encobertos e não foi subdividida.

Nos 108, 25 metros de rocha analisados, foram coletados dados de granulometria, estruturas sedimentares, direções de paleocorrentes, mergulhos e direção dos mergulhos das camadas, tamanho máximo de grão, características geométricas das camadas de rochas. Os resultados e interpretações são descritos nos capítulos a seguir.

7.1. Fácies Litológicas

O conceito de fácies apresentado em Dalrymple (2010) e que foi adotado neste trabalho é de um corpo rochoso caracterizado por uma combinação particular de litologias e estruturas físicas que permitem a distinção entre os corpos rochosos vizinhos. Esta definição pode carregar um significado genético.

Desta forma, utilizando os critérios de Miall (1977) a nomeação das fácies será dada pela junção da litologia seguida pela estrutura sedimentar deposicional e os códigos para suas abreviações são compostos pelas primeiras letras de ambas as características apresentadas (e.g. Pelitos Laminados; FI). Para este trabalho optou-se por usar os mesmos códigos encontrados em Miall (1978c), desta forma as letras que compõe o código das fácies representam o nome das fácies na língua inglesa.

As fácies encontradas na área de estudo estão apresentadas no quadro 3. As fácies definidas neste trabalho (Quadro de Fotos 1) foram agrupadas segundo os seus processos genéticos, desta forma, diferentes granulometrias podem ser classificadas na mesma fácies.

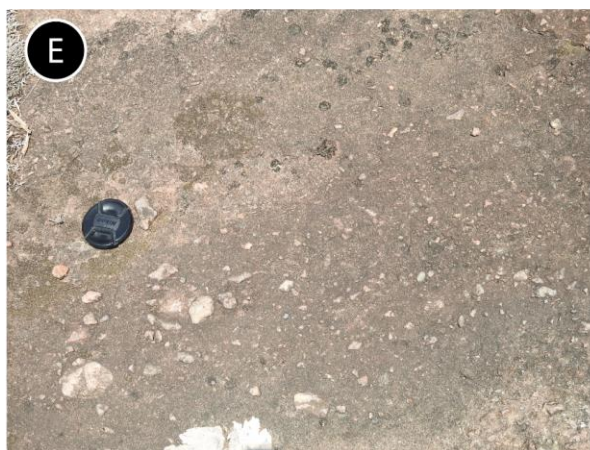
A análise faciológica realizada foi exclusivamente realizada em campo. As fácies encontram-se expostas em afloramentos tipo lajedos. Devido ao mergulho das camadas predominantemente apontado para sudoeste, as seções expostas foram encontradas ao longo de um relevo positivo na mesma direção, portanto, os pacotes rochosos foram analisados sob uma perspectiva ortogonal ao seu empilhamento. As fácies com granulometria mais finas, como FI e Sr com areias finas, apresentam geralmente maior grau de alteração. As demais fácies apresentam baixo grau de alteração. A composição média em todos os afloramentos pode ser considerada predominantemente arcoseana (Almeida 2004, Fambrini 2006) com contribuição de litoclastos ígneos de granitos e riolitos, e metamórficos com clastos de xistos (Fotografia 1). Esta composição corrobora os trabalhos anteriores na bacia (Almeida, 2004; Fambrini, 2006; Borba *et al.* 2008) que a área fonte desta pequena parte da bacia Santa Bárbara Ocidental foram os altos topográficos que a circundam, o alto de Caçapava do Sul e Cerro do Perau.

Quadro 3: Quadro das Fácies e suas descrições e interpretações.

Código de Fácies	Nome	Descrição	Interpretação
Fl	Pelitos Laminados	Pelito laminado de cor marrom claro, muito bem selecionado com laminações internas plano-paralelas milimetricamente espaçadas. Compõe camadas de até 10 centímetros e com geometria tabular. Composição detrítica, com grande presença de micas brancas.	Decantação de lama em suspensão em meio subaquoso de baixa energia.
Sr	Arenitos com estratificações cruzadas de marcas onduladas	Coloração bege, com granulometria variando entre areia muito fina a média, moderadamente selecionados, em geral, subanguloso e com alta esfericidade. Sua composição é quartzo-feldspática com numerosa presença de micas brancas. Ocorre nas porções mais basais intraclastos lamosos de até 2 centímetros arredondados com baixa esfericidade. As marcas onduladas são assimétricas e as faces de sotavento com direção média para 35°, compondo sets de até 25 cm de espessura.	Fluxo subcrítico, unidirecional, trativo, subaquoso com retrabalhamento do substrato. Migração de marcas onduladas.
Sm	Arenitos maciços	Arenitos bem selecionados com granulometria variando de areia fina a grossa em diferentes porções dos afloramentos. Grãos geralmente são de alta esfericidade e o arredondamento variando entre subanguloso a subarredondado. Quando muito grossos, ocorrem seixos e grânulos dispersos. Disposta em pacotes com espessura entre 25 - 100 cm de geometria lenticular. Algumas vezes apresentam contatos erosivos com as unidades subjacentes.	Fluxos hiperconcentrados de transporte de massa por fluxo gravitacional. Ou obliteração das estruturas sedimentares por fluidização posterior
St	Arenitos com estratificações cruzadas tangenciais	Coloração avermelhada moderadamente selecionadas com granulometria variando entre areia média a muito grossa, alto grau de esfericidade, bem arredondados e composição quartzo-feldspática. A estratificação é marcada por orientação dos grãos e gradação normal, milimetricamente espaçada, compondo sets que variam de 15 - 40 cm. Apresenta grânulos dispersos e, muitas vezes, nas bases dos estes grânulos, seixos e até blocos nas porções mais grossas, gradando para areias no topo. Apresentam intraclastos lamosos de até 4 centímetros arredondados com baixa esfericidade e grande quantidade de micas brancas e com seixos predominantemente graníticos arredondados com esfericidade moderada. A estratificação possui sentido de mergulho predominante variando entre 28° e 35°.	Transporte sob fluxo subcrítico, trativo e unidirecional. Migração de dunas subaquosas de crista sinuosas (3D)
Sl	Arenitos com estratificação cruzada de baixo ângulo	Cor avermelhada, granulometria variando entre areia média à areia muito grossa, alta esfericidade e subangulosos, com composição arcoseana, alta presença de micas dispostas em pacotes bem selecionados com grânulos dispersos. Internamente os estratos truncam em baixo ângulo (<15°) compondo sets de até 25 cm.	Deposição sob a transição entre fluxo subcrítico e crítico em regime subaquoso de dunas atenuadas ou leitos com baixa declividade. (Miall 1996)
Gt	Conglomerados com estratificações cruzadas tangenciais.	Cor variando entre cinza e vermelho, conglomerados matriz suportados, mal selecionados com grânulos e seixos predominantemente ígneos, arredondados e com esfericidade moderada a alta e clastos metamórficos angulosos de baixa esfericidade. A estratificação é marcada por gradação de seixos a grânulos e por vezes com clastos imbricados com o maior eixo paralelo ao paleofluxo, formando sets de até 25 cm.	Migração de dunas cascalhosas de crista sinuosas que movimentam-se em regime de fluxo supercrítico, subaquoso ou deslizamento de sedimento em regiões entre barras longitudinais. (Todd 1996)

Fonte: Autor (2021)

Quadro de Fotos 1: Fácies sedimentares encontradas na área de estudo. A) A fácies Fl intercalada com pequenas camadas de Sr. B) A fácies St compondo uma camada lenticular típica. C) Fácies Sr com gradação normal interna em *downlapping* em estruturas de baixo ângulo. D) Fácies Gt com imbricamento dos clastos com eixo paralelo ao paleofluxo. E) A fácies Sm com seixos dispersos com estruturas cruzadas acanaladas incipientes, indicando a obliteração da estrutura primária. F) Fácies Sl apresentando gradação normal.



Fonte: Autor 2021

Fotografia 1: Detalhe da composição. Fácies Sm com a presença de litoclastos. A matriz avermelhada é composta predominantemente por quartzo e feldspato e os litoclastos em tamanho grânulo com litoclastos ígneos (granito, riolito e ignimbrito) e metamórficos (xisto). Nota-se, ainda, como é texturalmente imaturo.



Fonte: Autor 2021.

7.2. Associação de Fácies

A análise de diversas fácies com relações genéticas entre si compreende uma ferramenta indispensável para a determinação dos ambientes deposicionais que preencheram a bacia. Neste trabalho, 4 associações de fácies foram identificadas.

7.2.1. Associação de Fácies de Prodelta (fácies FI, Sr e Sm)

Descrição:

Espessos pacotes de pelitos laminados (FI) que por vezes intercalam-se com arenitos finos a médios com laminações cruzadas de marcas onduladas (Sr) ou maciços (Sm) (Quadro de Fotos 2). Os pelitos ocorrem em pacotes mais espessos (0,25 metros a 1 m), enquanto os arenitos com marcas onduladas ou maciços compõem camadas finas entre os pacotes pelíticos, variando entre 10 a 15 centímetros e por vezes com intraclastos argilosos dispersos. As camadas arenosas

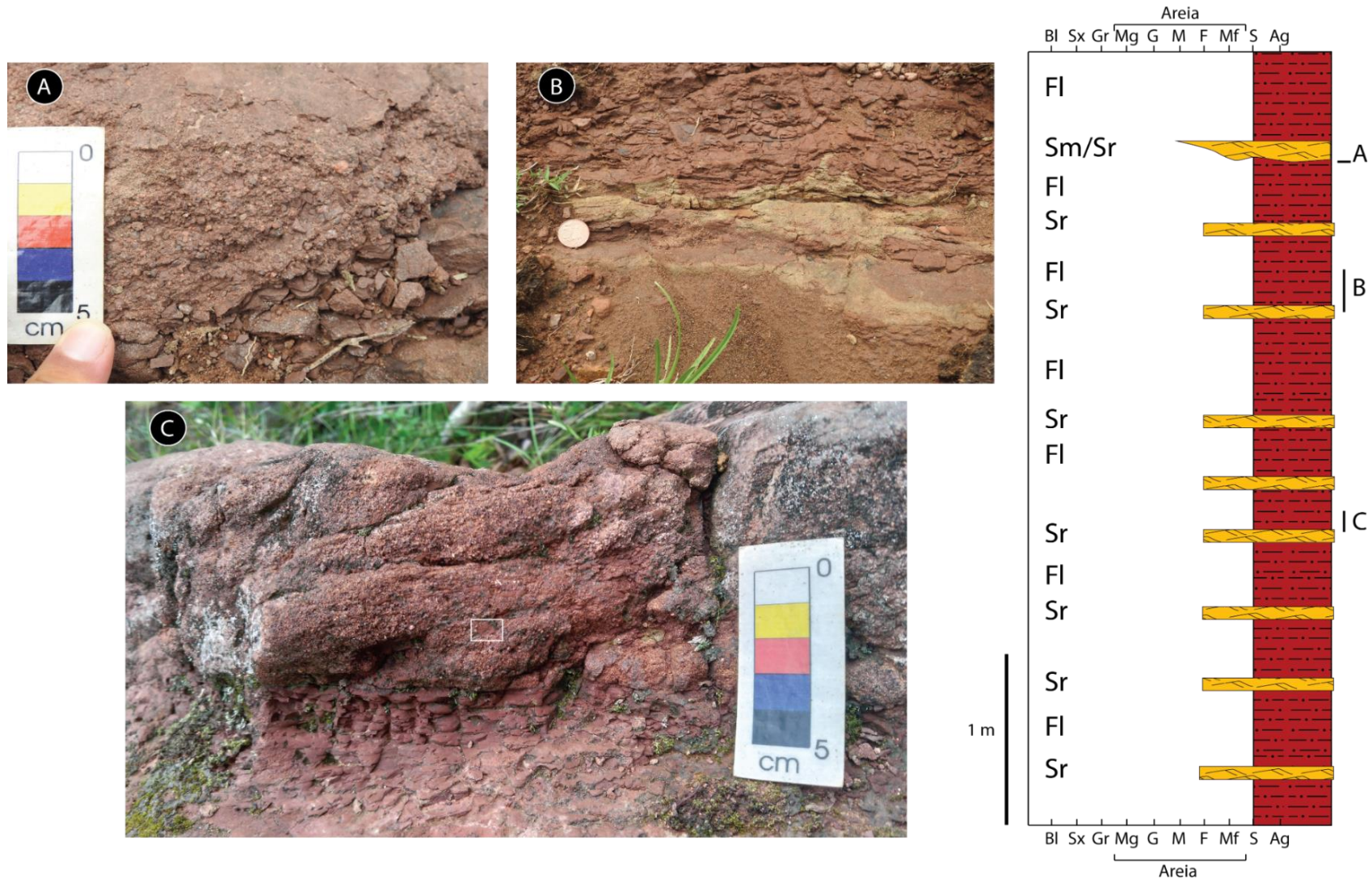
variam a espessura lateralmente, formando lentes em contato com as camadas lamosas tabulares. Estas fácies intercalam-se centimetricamente, com contatos abruptos e por vezes erosivos, formando heterolitos com padrões grano-estratocrescentes, marcados pelo aumento na espessura das camadas de arenitos. As marcas onduladas dos arenitos apresentam linhas de crista com direção NE-NW.

Esta associação de fácies aflora apenas próximo a uma drenagem que secciona a base da seção (Ponto 1). Esta sucessão de fácies é sucedida, em contato transicional, pelas associações de fácies de frente deltaicas distais dominadas por rios, que serão descritas posteriormente.

Interpretação:

O fato de esta associação ser constituída essencialmente por sedimentos finos, com padrões progradacionais e apresentar um contato superior gradacional com estratos de frentes deltaicas permite interpretá-la como depósitos de pró-delta. O domínio de fácies de sedimentos finos e o alto grau de seleção dos arenitos com ripples assimétricas sugere um ambiente deposicional de baixa energia. A presença predominante das camadas tabulares de lama, sem gretas de contração indica um ambiente de deposição subaquoso sem momentos de exposição subárea, onde predomina o assentamento gravitacional de partículas em suspensão nas porções distais dos lobos deltaicos. Os arenitos com marcas onduladas com intraclastos de lama indicam um aumento de energia do fluxo aquoso unidirecional de transportativo que retrabalhou o substrato lamoso que até então não estava totalmente consolidado, evidenciado pelos contatos erosivos e intraclastos argilosos dispersos. Os heterolitos caracterizados pela alternância de pelitos e arenitos maciços ou com laminações cruzadas de marcas onduladas representam fluxos hiperpicnais ou correntes existentes na porção transicional entre a frente deltaica e o prodelta (Bhattacharya, 2006; 2010, Vega *et al.* 2007).

Quadro de Fotos 2: Associação de Fácies de Prodelta. A) Detalhe entre contato erosivo entre as Fácies Sm e Fl; B) Fácies Fl muito alterada sobre pacote de Sr incipiente. C) Fácies Sl e Sr com intraclastos lamosos (em destaque dentro do retângulo) sobre Fl com laminação bem visível.



7.2.2. Associação de fácies de Frente Deltaica distal (FI, Sr, St, e Sm)

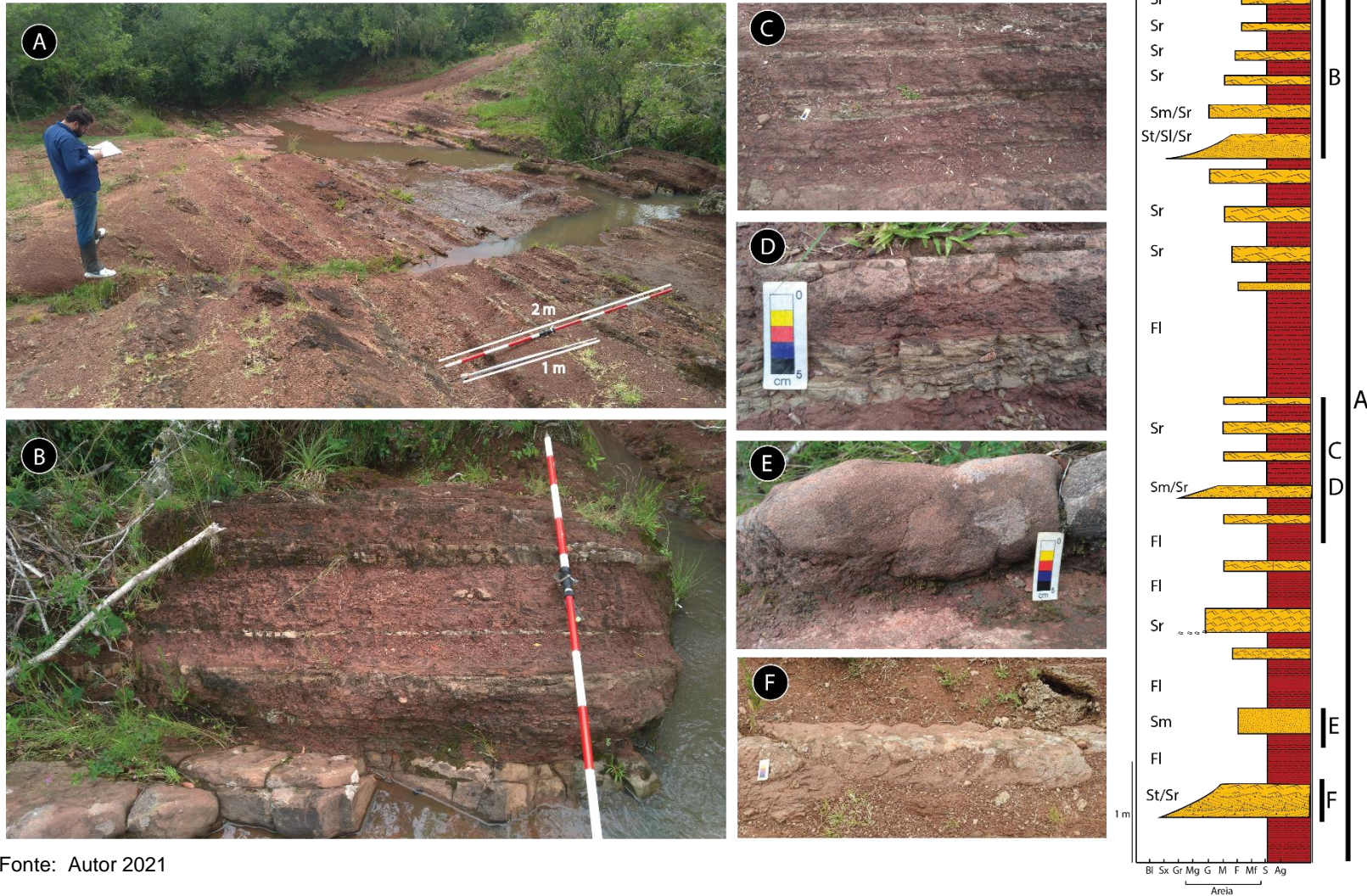
Descrição:

Diferencia-se dos depósitos de prodelta pela predominância de pacotes arenosos, compostos internamente por sets de estratificações cruzadas ($St < 0,3$ m) com grânulos e seixos (<3 cm) nas bases dos sets que gradam para arenitos médios e comumente sobrepostos por laminações cruzadas de marcas onduladas (Sr) ou de baixo ângulo (Sl). Frequentemente ocorrem camadas pelíticas centimétricas, bem como arenitos finos a médios de arenitos maciços (Sm) isolados, com base erosiva, podendo gradar também para marcas onduladas. A sobreposição das fácies constituem pacotes grano-estratocrescentes de até 1 m. As laminações cruzadas de marcas onduladas e as estratificações cruzadas tangenciais apresentam direção para NW-N. Esta associação ocorre nas proximidades da drenagem que secciona o limite da área de estudo (Quadro de Fotos 3) e tem contatos inferior comumente com os depósitos de prodelta e é sobreposta por depósitos de frentes deltaicas proximais.

Interpretação:

A predominância de fácies arenosas indica momentos de diferente competência do fluxo aquoso, havendo uma clara tendência do aumento da velocidade do mesmo para o topo da seção, devido a ocorrência das fácies St e Sl e a granocrescência ascendente. Os pacotes com cruzadas tangenciais na base, que gradam para Sl e Sr com gradação normal interna aos sets, indicam uma diminuição na velocidade do fluxo. As camadas de pelitos laminados indicam momentos de predomínio do assentamento gravitacional de partículas em suspensão nas porções distais dos lobos deltaicos (Tye e Coleman, 1989). A presença de arenitos maciços pode indicar fluxos hiperconcentrados de massas vindos da frente deltaica. A grano-estratocrescência dos pacotes representa a progradação da frente deltaica.

Quadro de Fotos 3: Associação de Fácies de Frente Deltaica Distal. A) Área tipo desta associação. Nota-se a intercalação de pacotes lamosos (marrom avermelhado) com pacotes arenosos mais amarelados. B) Intercalação entre pelitos e arenitos com tendência retrogradacional. C) Intercalação entre FI e Sr. D) Detalhe do afloramento inferior mostrando intercalação, da base para o topo FI, SI, FI, Sr, Sm. E) Sm (com estrutura de St incipiente) downlapando sobre FI. F) St com gradação normal e Sr no topo.



Fonte: Autor 2021

7.2.3. Associação de Fácies de Frente Deltaica proximal (Sr, St, Sl e Gt)

Caracterizada por grandes exposições de corpos lenticulares de arenitos médios a grossos, com predominância de estratificação cruzada tangencial (St) associada a arenitos com laminação cruzada de baixo ângulo (Sl) e de marcas onduladas (Sr), com lags centimétricos de seixos e blocos nas bases dos sets. Todos os pacotes arenosos descritos são formados por sets amalgamados, principalmente entre as fácies St's, podendo chegar até a 45 centímetros nos pacotes de areia muito grossa, e 25 centímetros nas porções mais ao topo. Estes sets amalgamados controlam a disposição da geometria lobular dos estratos, de extensão lateral em torno de 10 metros, e altura entre 1 e 2 metros. Localmente ocorrem conglomerados com estratificação cruzada tangencial (Gt), formando camadas tabulares de até 0,75 m de espessura e extensão lateral de 1 m, internamente com gradação normal e por vezes inversa. Os pacotes apresentam, em geral, estratogranocrescência ascendente com Sl de areia média e grânulos dispersos na base dos pacotes gradando para St de areia grossa ou muito grossa, com seixos na base dos sets, que podem chegar a blocos e conglomerados das fácies Gt. Os estratos cruzados têm direção média para NW. Estes depósitos geralmente apresentam contato basal transicional sobre os depósitos de frente deltaica distal.

Interpretação

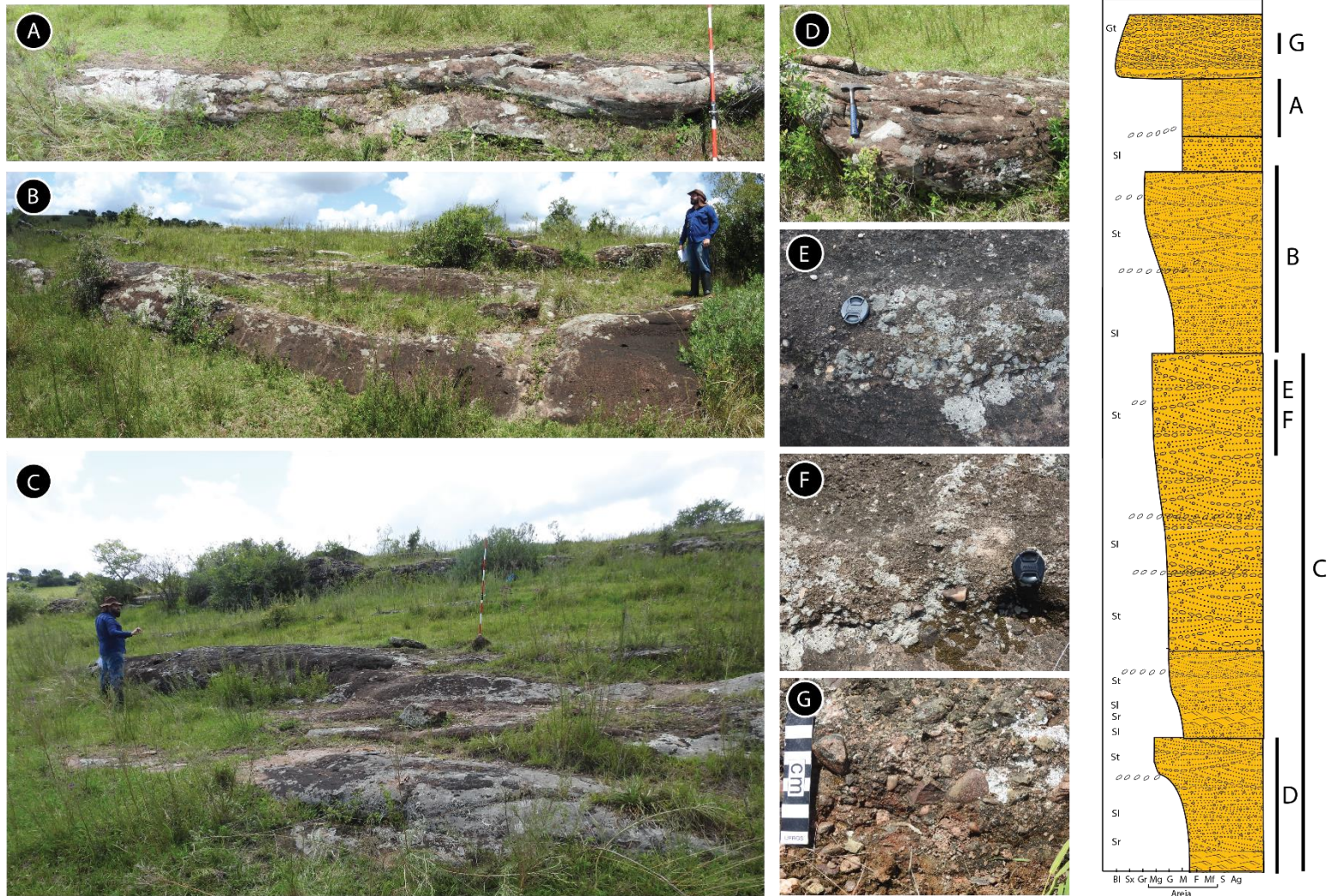
A sucessão de fácies geradas por correntes trativas unidirecionais, formando ciclos de estrato e granocrescência, sugere a progradação de frentes deltaicas dominadas por rios (Bhattacharya, 1991; 2006). A ocorrência de fácies de prodelta que antecedem esses depósitos corrobora esta hipótese. A predominância de arenitos com cruzadas tangenciais com granocrescência ascendente indica que a sedimentação foi marcada por sucessivas deposições de dunas subaquosas tridimensionais (Miall, 1996). O formato lobular dos pacotes arenosos com grano-estratocrescência indica um ambiente deposicional de frente deltaica com influência fluvial (Tucker, 2006).

A alternância entre as fácies Sr e Sl com mesma granulometria indica uma mudança na velocidade do fluxo. Porém, os pacotes com areias médias e estratificação cruzada de baixo ângulo que gradam para areias muito grossas com

cruzadas tangenciais evidenciam um aumento no aporte sedimentar e relativa estabilidade na velocidade do fluxo.

A presença de conglomerados com cruzadas tangenciais mostra momentos de fluxo supercrítico com alto aporte sedimentar que possibilitou a migração de dunas cascalhosas, com seixos na base dos foresets e com gradação normal para grânulos e matriz arenosa, representando waning-flows (Todd, 1996) As variações no sentido das paleocorrentes (figura 6) indicam frequente avulsão dos lobos deltaicos que provavelmente preenchem baixos topográficos entre a construção de um lobo e de outro (Plink-Björklund, 2011).

Quadro de Fotos 4: Associação de Fácies de Frente Deltaica Proximal. A) Afloramento típico de camada de St com geometria lenticular. B) Conjuntos de camadas lenticulares St truncando todas para norte (esquerda da foto). C) Área tipo desta associação, diversos lóbulos deltaicos aflorando como lajedos com protuberância para fora do solo. D) Detalhe de um set de St com seixos dispersos. E) Detalhe de lag de seixos na base de um set de St sobre outro em contato sobre discordância subaérea. F) St com grande volume de seixos sob contato erosivo com a camada inferior. G) Detalhe do pulso conglomerático com clastos ígneos.



7.2.4. Associação de Fácies de Canais Fluviais Distributários (Fácies Sr, St, Sl, Sm e Gt)

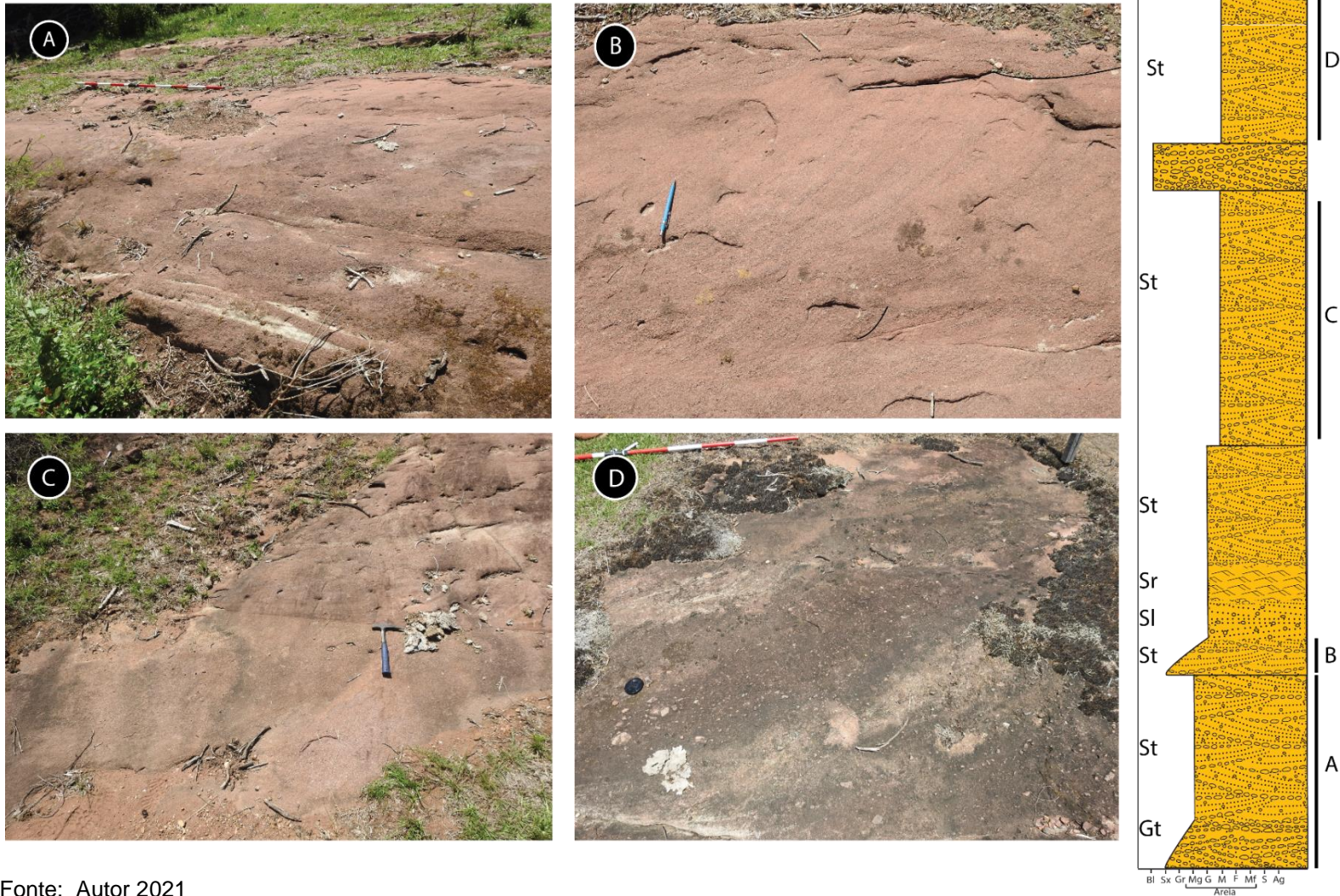
Esta associação de fácies ocorre, geralmente, sobrepondo os depósitos de frentes deltaicas. Compreende corpos tabulares arenosos espessos (até 5 metros), limitados na base por superfícies erosivas côncavas e/ou superfícies planas. Os sets apresentam espessuras de até 0,5 metros e são organizados em ciclos de granodecrescência ascendente. Internamente, os ciclos são compostos por arenitos médios a grossos, apresentando estratificação cruzada tangencial (St) com lags de seixos e blocos na base dos sets, laminações cruzadas de baixo ângulo (Sl) e de marcas onduladas (Sr). As estruturas cruzadas acanaladas sugerem a direção do paleofluxo exclusivamente para NW.

Pontualmente ocorrem arenitos maciços (Sm) com granulometria de areia muito grossa associados a conglomerados (Gt) e arenitos com estratificação cruzada tangencial (St).

Interpretação

A presença de corpos arenosos tabulares arranjados em ciclos de granodecrescência ascendente com superfícies erosivas e/ou planas capeadas por lags de intraclastos lamosos, apresentando internamente o domínio de estruturas trativas unidirecionais, sugere a deposição de canais fluviais (Miall, 1996). A ocorrência desses depósitos imediatamente acima dos depósitos de frente deltaica sugere canais fluviais distributários de planície deltaica. Lags de intraclastos lamosos indicam periódico retrabalhamento dos depósitos de planície deltaica lamosa por avulsões dos canais ou extravasamentos dos fluxos (Miall, 1973). Ciclos com base erosiva dispendo as fácies de St e Sr indicam que os canais distributários são preenchidos por formas de leito arenosas de crista reta e sinuosa, processos semelhantes são descritos por Lemons e Chans (1999). As laminações cruzadas de marcas onduladas no topo das sucessões indicam estágios finais de fluxo, caracterizando os *wanning-flows* (Miall, 1996, 2010; Todd, 1996).

Quadro de Fotos 5: Associação de fácies de Canais Distributários. A) Sobreposição das fácies SI, Sr e St. B) Sr cavalgantes na base sendo downlapadas por St (Nota-se a Gradação normal entre os cosets). C) St amalgamadas com estratodecrescência. D) Pacote agradacional de St's com lentes de seixos podendo indicar deslizamento de dunas cascalhosas (Todd, 1996).



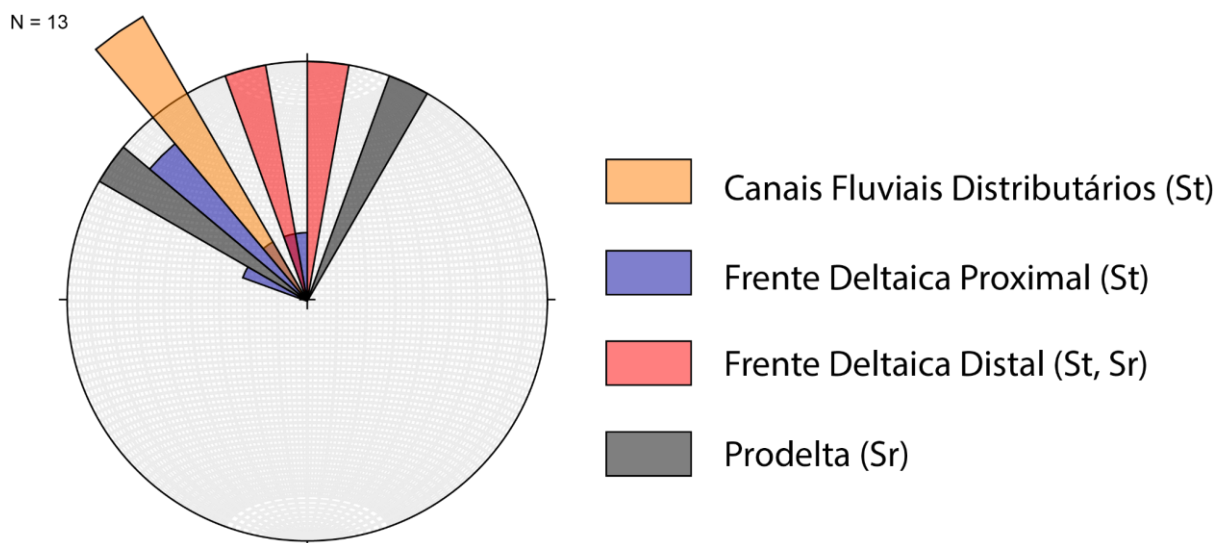
Fonte: Autor 2021

7.3. Paleocorrentes

A análise das paleocorrentes mostra que a tendência do paleofluxo da bacia seria para a direção N-NW (Figura 6). Apesar da recomendação de um número mínimo de 20 amostragens de paleocorrentes por localidade (Tucker, 2001) devido ao alto grau de alteração dos afloramentos, a medição dos planos de paleocorrente foi possível em apenas 13 planos. Desta forma, alguns aspectos desta análise podem estar estatisticamente mal representados. Contudo, as direções obtidas parecem confluir com as análises de outros trabalhos na bacia (Borba e Mizusaki, 2003; Almeida, 2004, Fambrini, 2006).

As direções mostram que a evolução da bacia tem uma tendência a ser cada vez mais unidirecional que é o que se espera da progradação de um sistema fluvial sobre um deltaico lacustre. A grande variação da direção entre as fácies deltaicas indica a presença de diversos pulsos de lóbulos deltaicos que foram se homogeneizando quando o sistema progradou para o fluvial.

Figura 6: Diagrama de Roseta das Paleocorrentes Medidas em Campo.



Fonte: Autor (2021)

7.4. Arquitetura Estratigráfica

A sucessão dos estratos da Formação Neoproterozóica Serra dos Lanceiros na área de estudo preserva depósitos deltaicos sendo sobrepostos por depósitos fluviais. A separação entre as porções de prodelta, frente deltaica e canal fluvial é marcada por superfícies estratigráficas encobertas. Com base nas análises sedimentológicas, de paleocorrente, geometria das camadas e sensoriamento remoto (Figura 7, 8 e 9), é possível afirmar que estes ambientes representam episódios distintos e consecutivos de deposição.

Os desenvolvimentos das unidades estratigráficas na bacia estudada se dão pela combinação de controles alogênicos e autogênicos (Magalhães et. al, 2020). A taxa de subsidência da bacia, mudanças climáticas, variação do aporte sedimentar e energia do fluxo influenciaram diretamente na anatomia dos ciclos estratigráficos que, por sua vez, não terão influência da variação do nível de base por se tratar de um contexto fluvial *upstream*.

Os ciclos estratigráficos de alta frequência podem ser subdivididos em 3 categorias segundo Zecchin (2007) são eles: Regressivos (R), Transgressivos (T) e Transgressivos-Regressivos (T-R). Estes ciclos são definidos pelo comportamento migratório da linha de costa. Como a bacia do presente trabalho foi formada em um contexto continental, a utilização dos termos “Regressivo(s)” e “Transgressivo(s)” será substituída pela utilização dos termos “Progradacional (P)” e “Retrogradacional (R)”, respectivamente, uma vez que, não é possível determinar a localização da paleolinha de costa. Segundo os critérios apresentados por Magalhães *et al.* (2020) para a definição das sequências de alta resolução apresentadas anteriormente, é possível analisar os padrões (P-R) nas seções levantadas em todas as ordens estratigráficas presentes na bacia. A recorrência, assim como as tendências verticais são observáveis e discutidas neste capítulo na descrição dos ciclos 5ª e 6ª ordens. Contudo, devido à falta de correlação lateral das seções, a mapeabilidade das superfícies estratigráficas e dos padrões de empilhamento não puderem ser realizados neste trabalho devido à necessidade de mais atividades de campo. Desta forma, as sequências de alta resolução não foram determinadas, pois a assinatura vertical das seções não é suficientes para tal (Magalhães *et. al*, 2020). Desta forma, este trabalho buscou descrever os ciclos estratigráficos entre 2ª e 6ª ordens estratigráficas seguindo os demais critérios.

A aplicabilidade das definições de tratos de sistemas convencionalmente utilizados na ES é amplamente condicionados à determinação da migração da paleolinha de costa da bacia ao longo do tempo geológico (Catuneanu, 2006, 2009).

Dentro de um contexto próximo a linha de costa (*downstream*) a análise das sequências em menores ordens estratigráficas de depósitos fluviais depende da identificação entre areia e lama, representando a relação entre paleocanais e planícies de inundação (Wright e Marriot, 1993). Para a determinação das sequências estratigráficas em deltas lacustres a denominação padrão dos tratos de sistemas (Trato de nível alto, trato de nível baixo, regressão e trato transgressivos) é usado para delimitar as sequências estratigráficas nestes ambientes (Lemons e Chans, 1999).

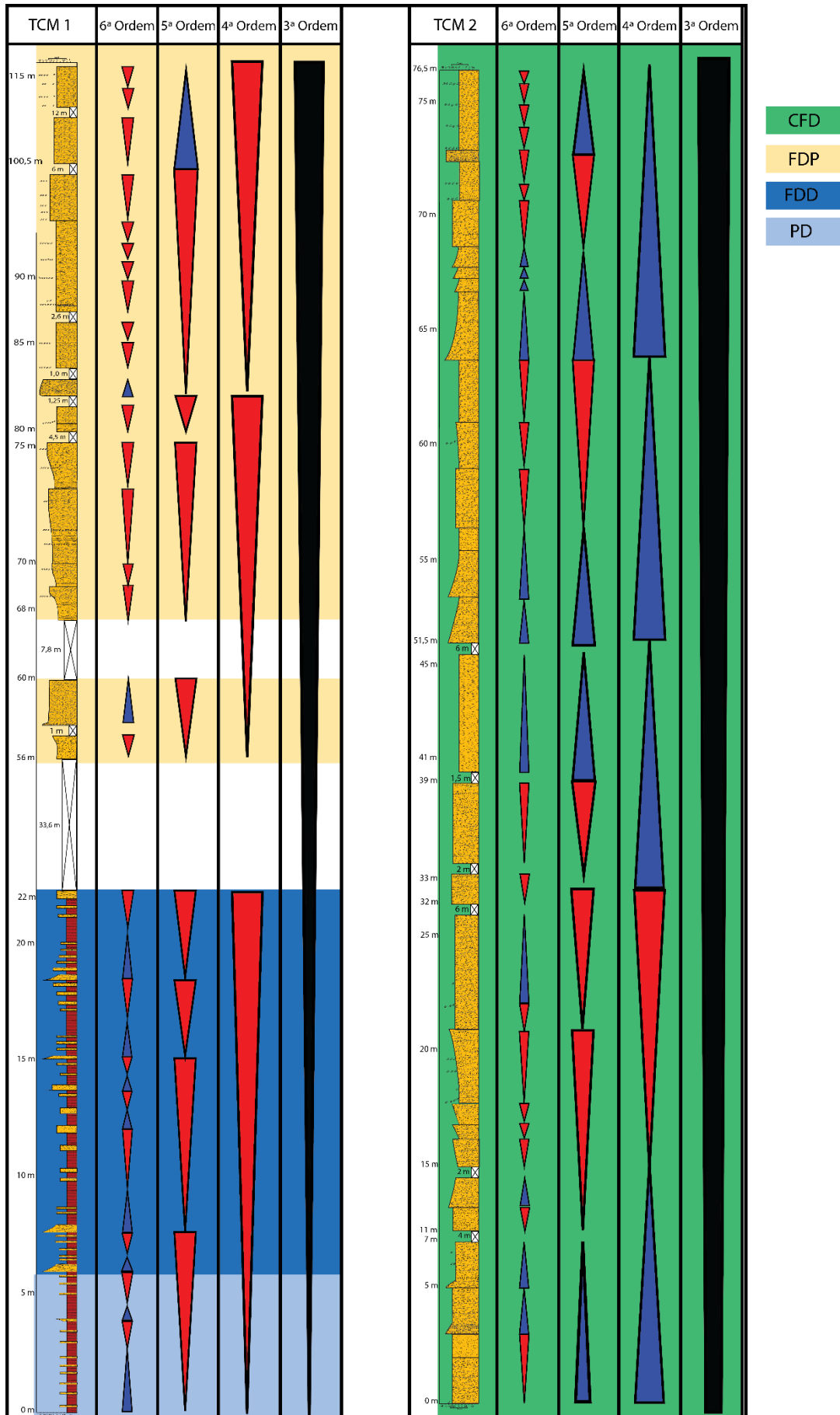
Contudo, apesar de apresentar um contexto deposicional de um delta lacustre com predominância de influência fluvial, os depósitos deltaicos da área de estudo não podem ter suas sequências deposicionais classificadas segundo as nomenclaturas clássicas devido à ausência de registros da paleolinha de costa e falta de correlação lateral. Outro fator dificultador desta classificação é a ausência de depósitos de planícies de inundação correlatos aos depósitos fluviais. Devido à idade Pré-cambriana da bacia (Paim et al. 2000, Chemale Jr. 2000, Oliveira et al. 2014) esta ausência de depósitos de inundação pode ser atribuída a característica deste período, uma vez que, a falta de vegetação dificulta a preservação dos depósitos lamosos (Ericksson *et al.*, 1997; Catuneanu, 2006).

Figura 7: Seções plotadas em Foto de Satélite. Seções TCM 1 (esquerda) e TCM 2 (direita) com o início e o fim marcados na imagem de satélite da área de estudo.



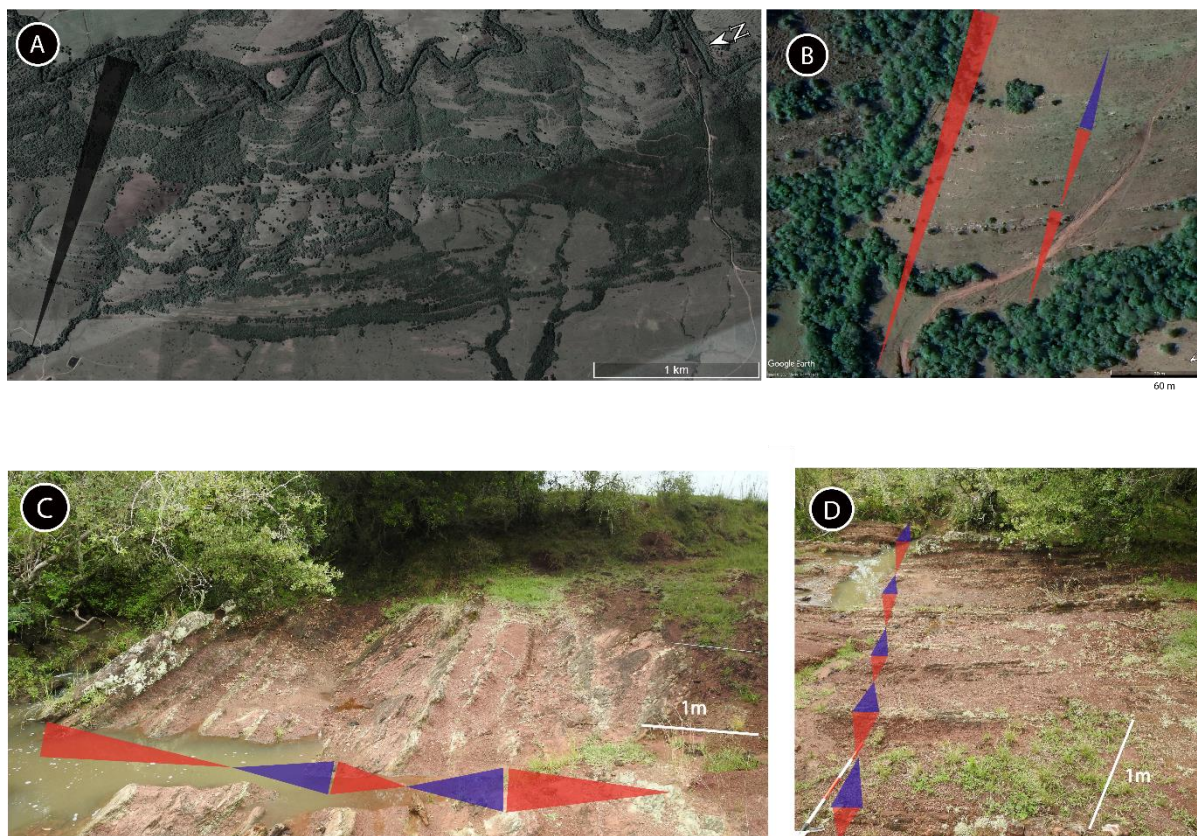
Fonte: Autor 2021

Figura 8: Seções TCM 1 e TCM 2 e suas interpretações estratigráficas. PD: Associação de Fácies de Prodelta. FDD: Associação de Fácies de Deltaica Distal; FDP: Associação de Fácies de Frente Deltaica Proximal. CFD: Associação de Fácies de Canais Fluviais Distributários.



Fonte: Autor (2021)

Figura 9: Ciclos estratigráficos vistos em imagens de satélite e fotomosaicos. A) Ciclo de 3ª ordem transpassando todo intervalo estudado da Fm. Serra dos Lanceiros B) Ciclos de 4ª e 5ª ordens evidenciando as camadas lenticulares da associação de fácies deltaica proximal. C) Ciclos de 5ª ordem visto em afloramento acompanhando as tendências granulométricas entre diferentes superfícies regressivas. D) Ciclos de 6ª ordem com as superfícies de inundação marcadas no meio das camadas pelíticas progradando até a base das camadas arenosas com gradação normal.



Fonte: Autor 2021

7.4.1. Ciclos Estratigráficos Alocíclicos (3ª e 4ª Ordens)

7.4.1.1. 3ª Ordem

A maior hierarquia estratigráfica observada nas seções levantadas possui comportamento progradante, visto desde a base até o topo de todo o empilhamento, totalizando 192 metros com alguns trechos encobertos. Esta tendência em geral é marcada pela estratogranocrescência em direção ao topo. A base é marcada pela presença dos pelitos intercalados com pacotes arenosos pouco espessos que vão tornando-se cada vez mais frequentes enquanto que os pacotes lamosos vão se estreitando. Nas porções mais intermediárias os pacotes lamosos estão ausentes e os pacotes arenosos apresentam gradação inversa com presença de seixos e blocos

dentro desses pacotes e lags conglomeráticos esporádicos. Próximo ao topo do empilhamento, predominam pacotes arenosos com gradação normal e corpos tabulares. Essa sucessão de padrões estratigráficos é caracterizada pela tendência da sobreposição das associações de fácies descritas anteriormente neste trabalho. Da base para o topo, a associação de fácies de prodelta com seus espessos pacotes lamosos sendo sobrepostos pela frente deltaica distal, depois a proximal e depois pelos depósitos fluviais.

Ciclos de terceira ordem ocorrem na escala temporal a partir de 100.000 anos, podendo compreender dezenas de milhões de anos e são relacionados desde a fatores tectônicos até fatores eustáticos e mudanças climáticas (Catuneanu, 2019). No caso da Fm. Serra dos Lanceiros, este ciclo representa o ciclo regressivo desta sub-bacia (Borba e Mizisaki 2003, Fambrini 2003, Almeida 2004) e a sobreposição dos seus distintos ambientes deposicionais (Fambrini, 2003). Segundo o autor, esta sub-bacia foi gerada por pulsos tectônicos relacionados a respostas de alívio tectônico pós orogenia. A progradação geral do empilhamento sugere que houve uma diminuição na taxa de subsidência, ou até mesmo reativações no soerguimento da área fonte, fazendo com que o espaço de acomodação fosse preenchido por depósitos cada vez mais proximais.

7.4.1.2. 4ª Ordem

Os ciclos de 4ª ordem são marcados por pacotes métricos progradacionais (P) e retrogradacionais (R) que podem compor ciclos progradacionais-retrogradacionais (P-R).

Os ciclos P de 4ª ordem são limitados na base por superfícies de regressão (SR) que dividem as sucessões de pacotes com padrão estragranocrescente. Tem espessura variando de 12 a 35 m e são caracterizados pelo aumento na espessura das camadas arenosas, bem como no tamanho de grão, podendo chegar a conglomerados clasto-suportados. Por muitas vezes, possuem espessos intervalos encobertos entre eles que podem esconder a real tendência destes ciclos.

Os ciclos R apresentam-se em padrões granoestratodecrescentes, possuem poucos intervalos encobertos dentro deles e estão associados aos depósitos fluviais. Tem espessura variando de 12 a 20 m e são caracterizados internamente pela diminuição no tamanho dos estratos e da granulometria, tendo na base muitas vezes lags conglomeráticos e seixos dispersos gradando para arenitos moderadamente selecionados com grânulos e seixos dispersos.

A única ocasião em que os ciclos P e R compõem um intervalo pro- e retrogradacional (P-R) é limitada na base e no topo por ciclos R, tem espessura de 30 m e está inserido no intervalo que representa uma mudança no sistema deposicional predominante.

Estes ciclos são fortemente influenciados por fatores alóctones mas já apresentam características de influência de fatores autóctones, marcando o limite entre a influência destas duas esferas de fatores controladores. Os momentos de deposição com padrões P estão fortemente influenciados pelo aumento da competência e capacidade do fluxo de transporte, provavelmente vinculada à uma variação climática. Da mesma forma, os momentos de deposição com padrões R indicam a diminuição destes fatores (Miall, 2014). A influência dos fatores autóctones se dá na variação interna das camadas que muitas vezes marcam as superfícies de regressão e inundação que limitam estes ciclos, passando a ser o fator dominante nos ciclos de 5ª e 6ª ordem, conforme discutiremos a seguir.

7.4.2. Ciclos Sedimentológicos (5ª e 6ª ordens)

7.4.2.1. 5ª Ordem

Os ciclos de 5ª ordem possuem entre 5 e 15 metros de espessura. São em sua grande maioria progradantes (P), porém ocorrem os padrões, retrogradantes (R) e P-R.

Os ciclos P encontram-se por todas as duas seções e por todos os ambientes deposicionais e são limitados no topo, geralmente, por uma superfície de inundação que marca um afogamento abrupto caracterizado por sedimentos mais finos do que os sotopostos. O padrão P geralmente é granoestratocrescente, compondo diversos pacotes com gradação inversa nos depósitos de frente deltaica. Eles também ocorrem entre pacotes espessos sem variação granulométrica, mas que possuem estratocrescência ascendente interna às camadas.

Os ciclos R ocorrem limitados no topo por superfícies de regressão, muitas vezes onduladas e erosivas, podendo haver lags conglomeráticos em algumas situações. Possuem espessura variando entre 5 e 7 metros e geralmente ocorrem entre pacotes arenosos fluviais que apresentam estratogranodecrescência entre eles e gradação normal interna.

Os ciclos P-R possuem espessura aproximada de 10 metros e ocorrem geralmente associados às camadas tabulares dos depósitos fluviais. Ocorrem limitados por superfícies regressivas e marcam um ciclo completo entre

granocrescência ascendente (P) e granodecrescência ascendente (R) logo em seguida.

Estes ciclos representam a resposta estratigráfica a variações internas dos ambientes deposicionais (Miall 2014, Catuneanu 2019, Magalhães *et al.* 2020). Os ciclos P quando representados por pacotes com gradação inversa indicam momentos de maior aporte sedimentar no sistema, enquanto que, os ciclos R indicam diminuição no aporte quando vistos através de camadas com gradação normal. Os ciclos P quando são caracterizados por tendências estratocrescentes ascendentes indicam intervalos de maior estabilidade e com gradativo aumento no aporte, que geram pacotes agradacionais com leve tendência de engrossamento para o topo. Da mesma forma, os ciclos R, que são caracterizados pela estratodecrescência ascendente, indicam maior estabilidade no aporte com gradual diminuição no mesmo. Os ciclos P-R representam ciclos completos preservados de aumento gradual do aporte e subsequente diminuição gradual. (Nichols 2009)

7.4.2.2. 6ª ordem

As menores unidades analisadas neste trabalho compreendem diversos ciclos P, R e P-R com espessura de 0,3 metros até 5 metros.

Os ciclos P correspondem principalmente a camadas arenosas com gradação inversa. Estas camadas possuem entre 1 e 2 metros de espessura e compreendem os lóbulos deltaicos. Estes ciclos podem ser caracterizados, também, por sucessivos sets de St que formam espessas camadas agradacionais com aumento na espessura dos sets. Há ainda um ciclo P diferente dos demais que marca o último intervalo de intercalações de pelitos e arenitos no limite entre o ambiente de frente deltaica distal e proximal. Este ciclo se distingue dos demais ciclos P pois ocorre através de camadas diferentes com a tendência da diminuição dos intervalos lamosos e o aumento dos intervalos arenosos.

Os ciclos R são normalmente encontrados relacionados à camadas arenosas tabulares dos depósitos fluviais que apresentam gradação normal. Outra configuração comum de ocorrência destes ciclos é a estratodecrescência ascendente dos sets de camadas espessas e agradacionais.

Os ciclos P-R são característicos dos depósitos de prodelta e de frente deltaica distal. Eles são marcados pelo aumento da recorrência de intervalos arenosos entre os pacotes pelíticos até que se atinja um pacote arenoso mais espesso com gradação normal e até o retorno de pacotes lamosos cada vez mais espessos, separados por pacotes arenosos cada vez menores. O início do ciclo geralmente ocorre no meio de

pacotes pelíticos, onde se encontram as superfícies de inundação e o padrão muda na base dos pacotes arenosos onde se localiza a superfície regressiva e terminam em uma nova superfície de inundação no topo do ciclo. Os ciclos P-R localizados nos demais ambientes deposicionais são caracterizados por um encontro de um pacote com gradação inversa encontrando pacotes com gradação normal no topo.

As variações cíclicas ligadas a esta hierarquia do registro sedimentar são atribuídas à sensibilidade dos depósitos à variações sazonais mais frequentes do aporte sedimentar. A gradação inversa dos ciclos P indica aumento gradual ou repentino do aporte, enquanto que, a gradação normal dos ciclos R são atribuídas à diminuição do mesmo (Nichols 2009). A estratocrescência que caracterizou diversos ciclos P são atribuídos a fluxos com maior capacidade, porém com o aporte constante, pois, indicam a migração de dunas subaquosas cada vez maiores. A estratodecrescência dos ciclos R, por sua vez, indica diminuição da capacidade do fluxo com estabilização do aporte sedimentar. Intervalos agradacionais que foram caracterizados pela granulometria máxima também indicam um aumento ou diminuição na competência do fluxo, porém, com pouca variação da capacidade. Os ciclos P-R dos ambientes mais distais indicam a maior sensibilidade destes ambientes à variação do aporte sedimentar, competência e capacidade. Desta forma, intervalos onde ocorrem contatos erosivos entre as fácies arenosas e pelíticas indicam pulsos de aumento da capacidade e competência do fluxo. Onde estes contatos erosivos são ausentes o que predomina são pulsos de aumento da competência e do aporte sedimentar. (Nichols, 2009)

7.4.3. Controles Alóctones e Autóctones na Configuração Estratigráfica

Devido ao soerguimento do alto de Caçapava do Sul durante a formação destes depósitos, fica clara a influência tectônica na formação do estilo estratigráfico da bacia (Almeida, 2004, Borba e Mizusaki, 2004). O clima parece ser um grande fator preponderante para o desenvolvimento dos depósitos. A glaciação do neoproterozóico terminou há 580 Ma (Fairchild e Kennedy 2007, Li *et al.* 2013) e a deposição durante um período de interglacial favoreceu maior carga hidráulica, e o potencial erosivo dos rios durante o final do Pré-cambriano (Catuneanu, 2006). Desta forma, levando em conta o caráter progradante do ciclo de 3ª ordem determinado, a conclusão de que devido ao soerguimento do alto de Caçapava do Sul juntamente com a alta descarga fluvial devido a influência climática controlaram o avanço dos depósitos proximais em direção ao depocentro. Os ciclos de 4ª ordem apresentam maior influência climática

do que tectônica. Sua ciclicidade muito bem marcada e condizente com os tratos de sistemas anteriormente discutidos mostram que, a sensibilidade interna dos ambientes deposicionais a flutuações climáticas é a principal e mais mapeável resposta atuante na configuração estratal da bacia.

Os ciclos de quinta e sexta ordem respondem aos fatores autocíclicos da bacia (Catuneanu, 2019, Magalhães *et al.* 2020). Desta forma, a discussão acerca destes ciclos precisa levar em conta os processos sedimentológicos básicos. O aporte sedimentar, capacidade e competência do fluxo são os fatores a serem considerados. A lei de Stokes, apesar de não ser tão preditiva para depósitos de areia grossa ou superiores (Nichols 2009) pode ser usada para compreender a ciclicidade dos depósitos autogênicos.

Lei de Stokes:

$$V = g \times D^2 \times (\rho_s - \rho_f) / 18\mu$$

V= velocidade do fluxo

g = aceleração gravitacional

D = diâmetro do sedimento

($\rho_s - \rho_f$) = diferença entre as densidades do sedimento (ρ_s) e do fluxo (ρ_f)

μ = Viscosidade do fluxo.

Considerando constantes a aceleração gravitacional e a diferença entre as densidades do sedimento e do fluxo (densidade do sedimento constante pois a proveniência e composição são constantes e o fluxo sempre é aquoso) pode-se discutir a ciclicidade sedimentológica através da relação entre velocidade do fluxo, diâmetro do sedimento e a viscosidade do fluxo. A velocidade do fluxo estará diretamente ligada à competência e a capacidade do fluxo, enquanto que o diâmetro estará condicionado ao aporte sedimentar. Desta forma, quanto menor a velocidade do fluxo, menor a granulometria transportada e vice versa. A viscosidade irá aumentar junto com a carga sedimentar, conforme a carga sedimentar aumenta, maior tende a ser a viscosidade do fluxo.

Os ciclos de alta resolução são marcados por granocrescência e granodecrescência internos das camadas (6ª ordem) ou entre camadas sobrepostas (5ª ordem) apresentando estratocrescência ou decrescência entre camadas ou internamente (diminuição do tamanho dos sets de St). Estes fatores são controlados

exclusivamente pelo aumento ou diminuição da velocidade do fluxo e por condições de estabilidade para a formação das formas de leito. (Nichols, 2009)

Portanto, a ciclicidade estratigráfica é relacionada nas mais distintas ordens. A constante influência do soerguimento da área fonte da bacia implicaram diretamente no aporte sedimentar que influenciará os ciclos sedimentológicos, assim como as variações climáticas influenciaram na competência e capacidade do fluxo e na conseqüente velocidade. Por fim, é possível observar que a tendência progradacional da bacia se reflete nas mais distintas ordens devido a tendência dos ciclos P serem maiores e mais constantes que os ciclos R (Figura 8).

7.5. Modelo Depositional

A ciclicidade estratigráfica descrita no capítulo anterior juntamente com a análise de paleoambientes proporcionada pelas associações de fácies interpretadas permitem a construção de um modelo deposicional de um delta continental. Assim como descrito por Paim (2000), a Bacia do Camaquã possui uma tendência progradante quando analisados os grandes grupos que a compõem. A área de estudo, em uma resolução muito maior que a descrita por Paim, registra a mesma tendência. A Formação Serra dos Lanceiros está sobreposta à Formação Seival. Segundo Almeida (2004) e Paim (1994) esta última é caracterizada por depósitos lacustres que seriam sobrepostos por depósitos de deltas lacustres. Essa interpretação é corroborada pelas associações de fácies encontradas neste estudo, que apontam para depósitos deltaicos sem influência de retrabalhamento por ondas ou marés. A área de estudo possui um aspecto geomorfológico interessante que é uma forma lenticular que parece ser uma continuação da Serra dos Lanceiros.

Desta forma, os depósitos descritos neste trabalho iniciaram-se como depósitos de pró-delta lacustre onde lamas micáceas depositadas por decantação depositaram sobre o leito do paleolago (Tye e Coleman, 1989). Diversos pulsos de fluxo trativo subcrítico com carga arenosa, ocasionados por descargas maiores por conta de enxurradas, retrabalharam o substrato lamoso e depositaram diversos pacotes arenosos com os intraclastos lamosos. Esses episódios tempestuosos ocorreram juntamente com a progradação do sistema que ocasionou o predomínio avanço da frente deltaica distal sobre o prodelta, aumentando cada vez mais a presença de fluxos trativos arenosos carregados de areia sobre o substrato lamoso (Tye e Coleman 1989, Caineng *et al.* 2010, Barbosa e Nogueira 2011).

Após sucessivos pulsos da frente deltaica depositando-se sobre o pró-delta, os depósitos de frente deltaica proximal começam a progradar sobre o sistema

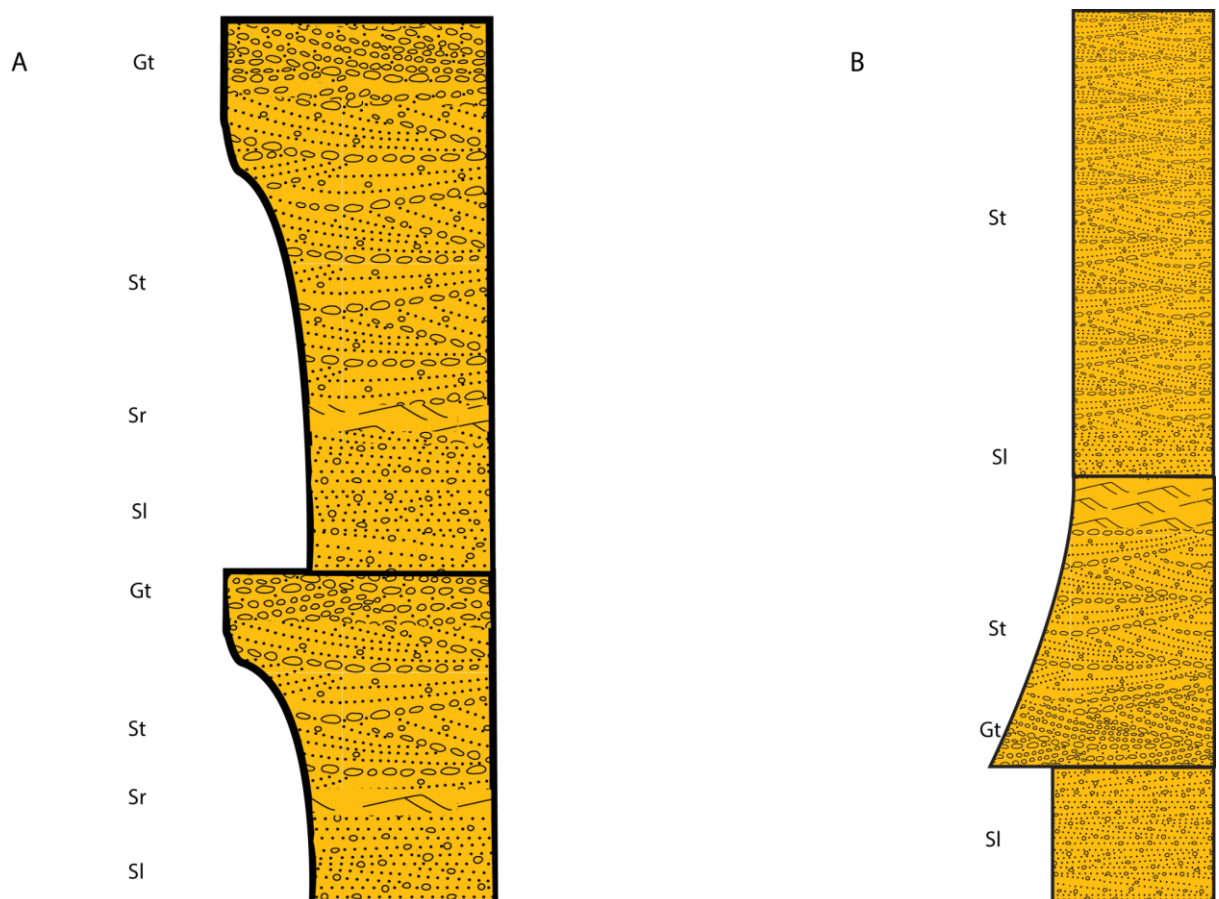
depositando uma série de dunas subaquosas com crista sinuosa cavalgando-se umas sobre as outras (Bhattacharya 2006). Estas dunas compunham diversos lóbulos deltaicos alongados que amalgamados refletem a feição geomorfológica característica da área do estudo. Esta sucessão de lóbulos indica a construção de diversas barras de desembocadura do delta, a variação nas paleocorrentes indicam distintos episódios em um curto período de tempo, análogo ao que ocorre no delta do Mississipi (Tye e Coleman 1989, Bhattacharya 2006). Isto indica a predominância do fluxo subcrítico trativo atuando no depósito com momentos de alto aporte sedimentar, formando conglomerados e arenitos conglomeráticos ou momentos de fluxo supercrítico com pouco aporte sedimentar formando estratificações de baixo ângulo. De acordo com Miall (1977) o carácter amalgamado das paleodunas sugere exposições subáreas e uma taxa de sedimentação maior do que a de subsidência da bacia, evidenciando a tendência prográdante da bacia (Caineng *et al.* 2010). A grande presença de sedimentos grossos se assemelha com deltas próximo a área fonte (Bell, 2009).

Os depósitos arenosos tabulares fluviais representam os estágios finais da influência do sistema lacustre na configuração deposicional da bacia, marcados por depósitos de canais distributários de planície deltaica no estilo de rios entrelaçados, análogos aos encontrados por Barbosa e Nogueira, 2011 na bacia Amazônica. A predominância de ciclos P-R de 4^a, 5^a e 6^a ordens em camadas espessas evidenciam que estes depósitos possuíam condições de maior estabilidade para a sua deposição (Boyd *et al.* 1999, Catuneanu 2006). O predomínio de paleodunas sinuosas indica que a deposição em canais de rios entrelaçados de alta sinuosidade que são sobrepostas por barras longitudinais (Todd, 1996). A seção ideal destes depósitos (Figura 10) inicia-se com depósitos de lençóis arenosos em leitos de baixa declividade. Estes leitos são sobrepostos por dunas subáquosas de base cascalhosas indicando um aumento do aporte sedimentar sem redução da capacidade do fluxo. A diminuição constante na energia do fluxo reflete diretamente na capacidade do fluxo e nas estruturas que serão geradas nos depósitos arenosos. Por este motivo, as dunas subáquosas vão dando espaço gradativamente para leitos arenosos com marcas onduladas assimétricas unidirecionais. Esta tendência deposicional indica o aumento da estabilidade no rio, que passa a registrar intervalos agradacionais.

Desta forma, o modelo deposicional proposto é uma sucessão de avanço constante dos ambientes deltaicos sobre o lacustre. Os processos de decantação de lama do prodelta são esporadicamente interrompidos por enxurradas de plumas arenosas oriundas da frente deltaica distal que avançam lentamente devido a

influência tectônica. Com o posterior avanço de leitos arenosos e dunas subaquosas lenticulares sobre as camadas lamosas de forma heterolítica, a frente deltaica distal já predominava depositando sobre um assoalho de baixo ângulo de inclinação. A progradação do delta continuou através da sobreposição da frente deltaica proximal. Os depósitos de lóbulos deltáicos com granulometria muito mais grossa do que as comumente encontradas em depósitos deltaicos (Tye e Coleman 1989, Bhattacharya 2006) devem-se ao fato da proximidade da área fonte (Bell, 2009) ou pelas características deposicionais do Pré cambriano que, pela falta de vegetação, acaba não preservando depósitos finos e acelerando o intemperismo físico, disponibilizando para o sistema mais detritos (Erickson *et al.* 1998). Por fim, os canais fluviais distributários de rios entrelaçados associados planícies deltaicas passaram a dominar o sistema.

Figura 10: Seções ideais de A) Frente deltaica distal com lóbulos amalgamados e B) Barras Fluviais com camadas tabulares.



Fonte: Autor 2021

8. CONCLUSÃO

A análise estratigráfica em distintas resoluções permitiu o desenvolvimento de diversas suposições sobre os controles deposicionais da porção estudada da bacia. Os limites entre a atuação da influência dos fatores autóctones e alóctones foram estabelecidos segundo os critérios propostos por Miall, (1996 e 2010), Catuneanu (2006 e 2019) e Magalhães *et al.* (2020), assim como as características anatômicas dos ciclos estratigráficos de alta e baixa hierarquia (Zechim, 2013). Além disso, análises paleoambientais considerando as peculiaridades do pré-cambriano foram realizadas e permitiram a caracterização de um delta neoproterozóico continental que marca a transição entre duas sequências deposicionais de segunda ordem distintas da bacia (Fambrini 2003, Borba e Mizusaki 2003).

Os ciclos estratigráficos de 3ª ordens identificados na seção levantada contribuíram no entendimento da evolução deste delta, contudo foi possível delimitar a influência do tectonismo (Almeida 2004, Borba e Mizusaki, 2003) e clima nestas ordens estratigráficas (Miall, 2010). Os ciclos de 4ª ordem foram os mais interessantes do levantamento pois eles mostraram o limite da influência dos fatores autóctones, mostrando a relação entre a progradação constante e *coarsening up* e *fining up* sendo ocasionados por variações climáticas. Os ciclos de 5ª e 6ª ordens foram interpretados como completamente autogênicos. Apesar do critério da mapeabilidade de Magalhães *et al* 2020 não pode ser cumprido e devido ao cronograma interrompido deste trabalho, a delimitação destes ciclos pode ser marcada pelos critérios padrões de empilhamento recorrência dos padrões e as tendência dos ciclos.

Por fim, como este trabalho é parte de um estudo interrompido, futuras investigações podem ser feitas para a validação de seus resultados. O grande número de porções encobertas e a falta de mapeabilidade e correlação lateral das seções podem ser sanadas com novos levantamentos de perfis colunares na área. As drenagens que cortam o relevo quase que na direção strike do acamamento são ótimas candidatas para este tipo de análise. Levantamento com *Ground Penetration Radar* (GPR) podem fornecer ótimos resultados para o preenchimento das lacunas de rocha encoberta.

REFERÊNCIAS

- AITKEN, John F.; FLINT, Stephen S. **The application of high-resolution sequence stratigraphy to fluvial systems: a case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky, USA.** *Sedimentology*, v. 42, n. 1, p. 3-30, 1995.
- ALLEN, J. R. L. **Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders.** *Sedimentary Geology*, v. 33, n. 4, p. 237-293, 1983.
- ALMEIDA, Renato Paes de. **Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai oriental).** 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BARBOSA, Roberto Cesar de Mendonça; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. **Paleoambiente da Formação Prosperança, embasamento neoproterozóico da Bacia do Amazonas.** *Brazilian Journal of Geology*, v. 41, n. 1, p. 1-17, 2011.
- BELL, C. Mike. **Quaternary lacustrine braid deltas on Lake General Carrera in southern Chile.** *Andean Geology*, v. 36, n. 1, p. 51-65, 2009.
- BITENCOURT, M. F. Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: geologia e relações com o corpo granítico. *In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, v. 1, p. 37-48, 1983.
- BLUM, Michael D. **Genesis and Architecture of Incised Valley Fill Sequences: A Late Quaternary Example from the Colorado River, Gulf Coastal Plain of Texas: Chapter 10: Recent Applications of Siliciclastic Sequence Stratigraphy.** 1993.
- BORBA, André Weissheimer de; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. **Santa Bárbara Formation (Caçapava do Sul, southern Brazil): depositional sequences and evolution of an Early Paleozoic postcollisional basin.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, n. 5, p. 365-380, 2003.
- BORBA, André Weissheimer de; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. **Significado tectônico dos depósitos de leques aluviais da Formação Santa Bárbara (Eo-Paleozóico) na região de Caçapava do Sul (RS, Brasil).** *Pesquisas em Geociências*. Porto Alegre, RS. Vol. 29, n. 1 (2002), p. 31-41, 2002.
- BORBA, André Weissheimer de; VIGNOL-LELARGE, Maria Lidia Medeiros; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel. **Uplift and denudation of the Caçapava do Sul granitoids (southern Brazil) during Late Paleozoic and Mesozoic: constraints from apatite fission-track data.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, n. 6, p. 683-692, 2002.
- BORBA, André Weissheimer de. **Evolução geológica da "Bacia do Camaquã" (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica.** 2006.
- BORBA, André Weissheimer de et al. **Santa Bárbara Formation (Early Paleozoic, Caçapava do Sul, southern Brazil): Petrographic and Sm-Nd isotopic provenance parameters.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 26, n. 4, p. 485-497, 2008.

BOSE, Pradip K. et al. **Sedimentation patterns during the Precambrian: a unique record ?**. *Marine and Petroleum Geology*, v. 33, n. 1, p. 34-68, 2012.

BOYD, R. et al. Development of a nonmarine sequence stratigraphic model. In: **American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Annual Meeting**, San Antonio, TX, USA. 1999.

CAINENG, Zou et al. **Shallow-lacustrine sand-rich deltaic depositional cycles and sequence stratigraphy of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China**. *Basin Research*, v. 22, n. 1, p. 108-125, 2010.

CATUNEANU, Octavian; ERIKSSON, Patrick G. **Sequence stratigraphy of the Precambrian Rooihoogte–Timeball Hill rift succession, Transvaal Basin, South Africa**. *Sedimentary Geology*, v. 147, n. 1-2, p. 71-88, 2002.

CATUNEANU, Octavian; GALLOWAY, William E.; KENDALL, Christopher G. St. C.; MIAL, Andrew D.; POSAMENTIER, Henry W.; STRASSER, André; TUCKER, Maurice E. **Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature**. *Newsletters on Stratigraphy, Stuttgart-DE*, v. 44/3, p. 173–245, 2011.

CATUNEANU, Octavian. **Scale in sequence stratigraphy**. *Marine and Petroleum Geology*, [s. l.], n. 106, p. 128-159, 2019.

CATUNEANU, Octavian. **Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology. Stratigraphy & Timescales**, [s. l.], v. 2, 2017.

Chemale Jr. F. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-Rio-Grandense. In: Holz M., De Ros L.F. (eds.) **Geologia do Rio Grande do Sul**. Editora UFRGS, Porto Alegre, p. 13-52.

ERIKSSON, P. G. et al. **An introduction to Precambrian basins: their characteristics and genesis**. *Sedimentary Geology*, v. 141, p. 1-35, 2001.

ERIKSSON, Patrick G. et al. **Precambrian clastic sedimentation systems**. *Sedimentary Geology*, v. 120, n. 1-4, p. 5-53, 1998.

FAIRCHILD, Ian J.; KENNEDY, Martin J. **Neoproterozoic glaciation in the Earth System**. *Journal of the Geological Society*, v. 164, n. 5, p. 895-921, 2007.

FAMBRINI, GELSON LUÍS; JANIKIAN, LILIANE; ALMEIDA, RENATO PAES DE; FRAGOSO-CESAR, ANTONIO ROMALINO S. **O Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) Na Sub-Bacia Camaquã Central, RS: Estratigrafia E Sistemas Depositionais**. *Revista Brasileira de Geociências*, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 227-238, 2005.

FAMBRINI, Gelson Luís. **O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FRAGOSO-CESAR, ANTONIO ROMALINO SANTOS; ALMEIDA, R. P.; FAMBRINI, G. L. **Estratigrafia e evolução paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Ocidental, Rio Grande do Sul, Brasil**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 3, p. 550, 2006.

FRAGOSO-CESAR, ANTONIO ROMALINO SANTOS et al. **The Camaquã extensional basin: Neoproterozoic to early Cambrian sequences in southernmost Brazil**. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 3, p. 442-445, 2017.

JAMES, Noel P.; DALRYMPLE, Robert W. 2010 (Ed.). **Fácies Models 4**. p. 586.

LECKIE, D. A.; BOYD, R. Towards a nonmarine sequence stratigraphic model. In: **American Association of Petroleum Geologists Annual Convention**, Salt Lake City. 2003. p. 14.

LEMONS, David R.; CHAN, Marjorie A. **Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho**. AAPG bulletin, v. 83, n. 4, p. 635-665, 1999.

LI, Zheng-Xiang; EVANS, David AD; HALVERSON, Galen P. **Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland**. Sedimentary Geology, v. 294, p. 219-232, 2013.

LIMA, Evandro Fernandes de; SOMMER, Carlos Augusto; NARDI, Lauro Valentim Stoll. **O Vulcanismo Neoproterozóico-Ordoviciano no Escudo Sul-rio-grandense: Os Ciclos Vulcânicos da Bacia do Camaquã**. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Centro de Investigação do Gondwana - Instituto de Geociências. 50 Anos de Geologia. 1. ed. Porto Alegre-RS: Comunicação e Identidade, 2007. p. 79-96.

MAGALHÃES, A.J.C.; et al. **High-resolution sequence stratigraphy applied to reservoir zonation and characterisation, and its impact on production performance: shallow marine, fluvial downstream, and lacustrine carbonate settings**. Earth-Science Reviews, [s. l.], v. 210, 2020.

MARCONATO, André et al. **Pre-vegetation fluvial floodplains and channel-belts in the Late Neoproterozoic–Cambrian Santa Bárbara group (Southern Brazil)**. Sedimentary Geology, v. 300, p. 49-61, 2014.

MIALL, A. D. **The geology of fluvial deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology** 1996. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 582p.

MIALL, A. D. **An introduction to rift basins and their sediments**. Sedimentary Geology, [s. l.], n. 147, p. 3-8, 2002.

MIALL, A. D. **Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis**. AAPG Bulletin, [s. l.], v. 86, n. 7, p. 1201-1216, 2002.

MIALL, A. D. **A review of the braided-river depositional environment**. Earth-Science Reviews, v. 13, n. 1, p. 1-62, 1977.

MIALL, A. D. **Fluvial depositional systems**. Berlin: Springer International Publishing, 2014.

Oliveira C.H.E., Chemale Jr. F., Jelinek A.R., Bicca M.M., Phillip R.P. 2014. **U-Pb and Lu-Hf Isotopes applied to the evolution of the late to post-orogenic transtensional basins of the Dom Feliciano Belt, Brazil**. Precambrian Research, 246:240-255.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; JUNIOR, Farid Chemale; WILDNER, Wilson. **Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS)**. Ciência e Natura, v. 36, n. 3, p. 183-193, 2014.

PAIM P.S.G., CHEMALE Jr. F., LOPES C. 2000. **A Bacia do Camaquã**. Geologia do Rio Grande do Sul, CIGO/UFRGS, Porto Alegre, p. 231-274.

PLINK-BJÖRKLUND, P. (2012). **Effects of tides on deltaic deposition: Causes and responses**. *Sedimentary Geology*, 279, 107-133.

PHILIPP, Ruy Paulo; PIMENTEL, Marcio Martins; CHEMALE JR, Farid. **Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: geological relationships and U-Pb geochronology**. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, p. 83-104, 2016.

POLIZEL, Silvia Palotti; DE FÁTIMA ROSSETTI, Dilce. **Caracterização morfológica do delta do rio Doce (ES.) com base em análise multi sensor**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 2, 2014.

POSAMENTIER, Henry W. **Lowstand alluvial bypass systems: incised vs. unincised**. *AAPG bulletin*, v. 85, n. 10, p. 1771-1793, 2001.

POTTER, Paul Edwin; PETTIJOHN, Francis John. **Paleocurrents and basin analysis**. Springer Science & Business Media, 1977. (<https://www.springer.com/gp/book/9783642618895>)

PRINCIPLES of Sequence Stratigraphy: OCTAVIAN CATUNEANU. 1. ed. [S. l.]: Elsevier, 2006. 375 p. ISBN 978-0-444-51568-1.

RODRIGUES, Amanda Goulart. **Composição primária e padrões diagenéticos dos arenitos da seção Rifte no Campo de Caioba, sub-bacia de Sergipe**. 2012.

SCHOLZ, Christopher A.; ROSENDAHL, Bruce R.; SCOTT, Deborah L. **Development of coarse-grained facies in lacustrine rift basins: Examples from East Africa**. *Geology*, v. 18, n. 2, p. 140-144, 1990.

SELLEY, Richard C. **A classification of paleocurrent models**. *The Journal of Geology*, v. 76, n. 1, p. 99-110, 1968. (https://www.jstor.org/stable/30064946?read-now=1&refreqid=excelsior%3A447a2d2cff31511b1f36d1bf94e75273&seq=1#page_scan_tab_contents)

SHANLEY, Keith W.; MCCABE, Peter J. **Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata**. *AAPG bulletin*, v. 78, n. 4, p. 544-568, 1994.

TODD, SIMON P. **Process deduction from fluvial sedimentary structures**. *Advances in fluvial dynamics and stratigraphy*, p. 299-350, 1996.

TONG, Qiang et al. **Spatiotemporal evolution of single sandbodies controlled by allocyclicity and autocyclicity in the shallow-water braided river delta front of an open lacustrine basin**. *Open Geosciences*, v. 13, n. 1, p. 98-121, 2021.

TUCKER, Maurice E. (Ed.). **Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks**. John Wiley & Sons, 2009. (https://books.google.com.br/books?id=Yebzay3a0FwC&pg=PA1&hl=pt-BR&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false)

TYE, Robert S.; COLEMAN, James M. **Depositional processes and stratigraphy of fluvially dominated lacustrine deltas; Mississippi delta plain**. *Journal of Sedimentary Research*, v. 59, n. 6, p. 973-996, 1989.

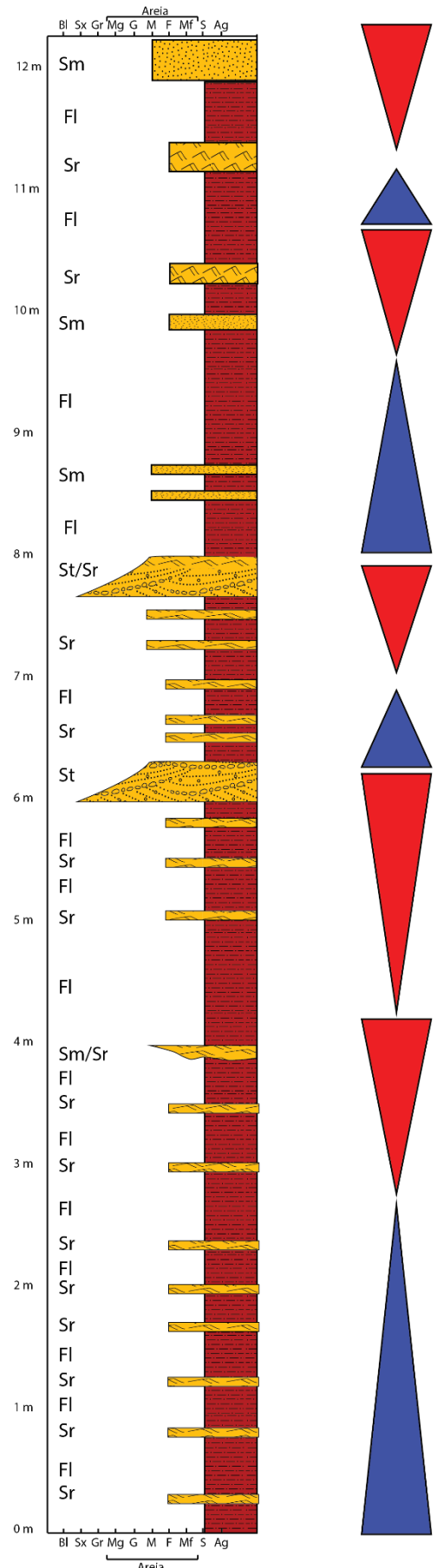
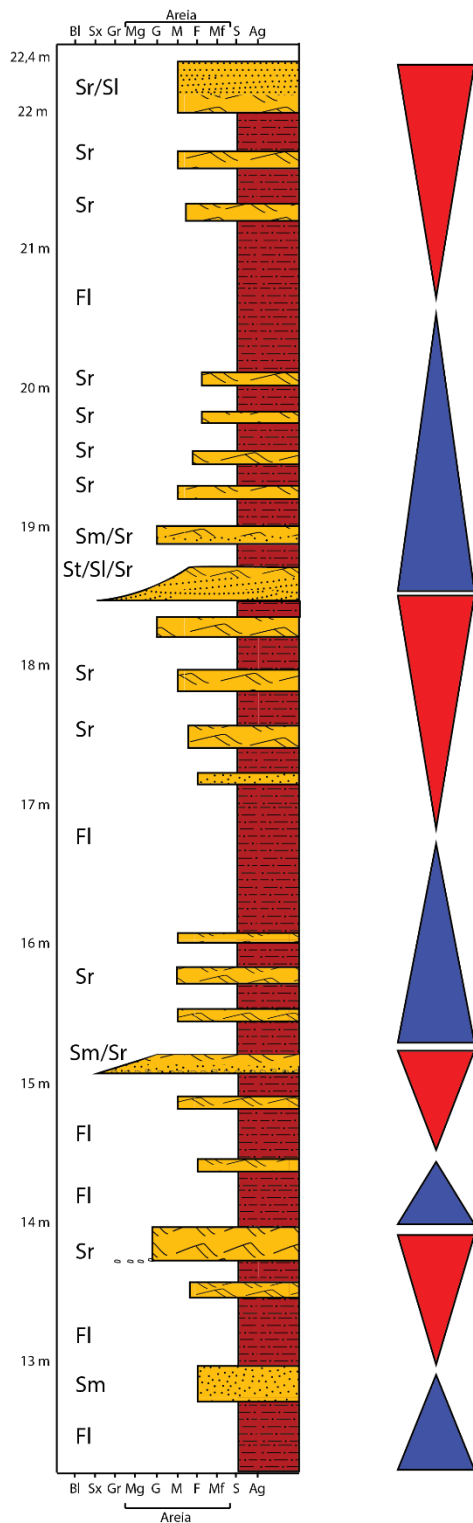
VEGA et al. Delta-Lacustre da e Mioceno da Parte Leste da Bacia do Solimões: Implicações na História do Rio Amazonas *In*: XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – XI ABEQUA, Belém, Brasil 2007

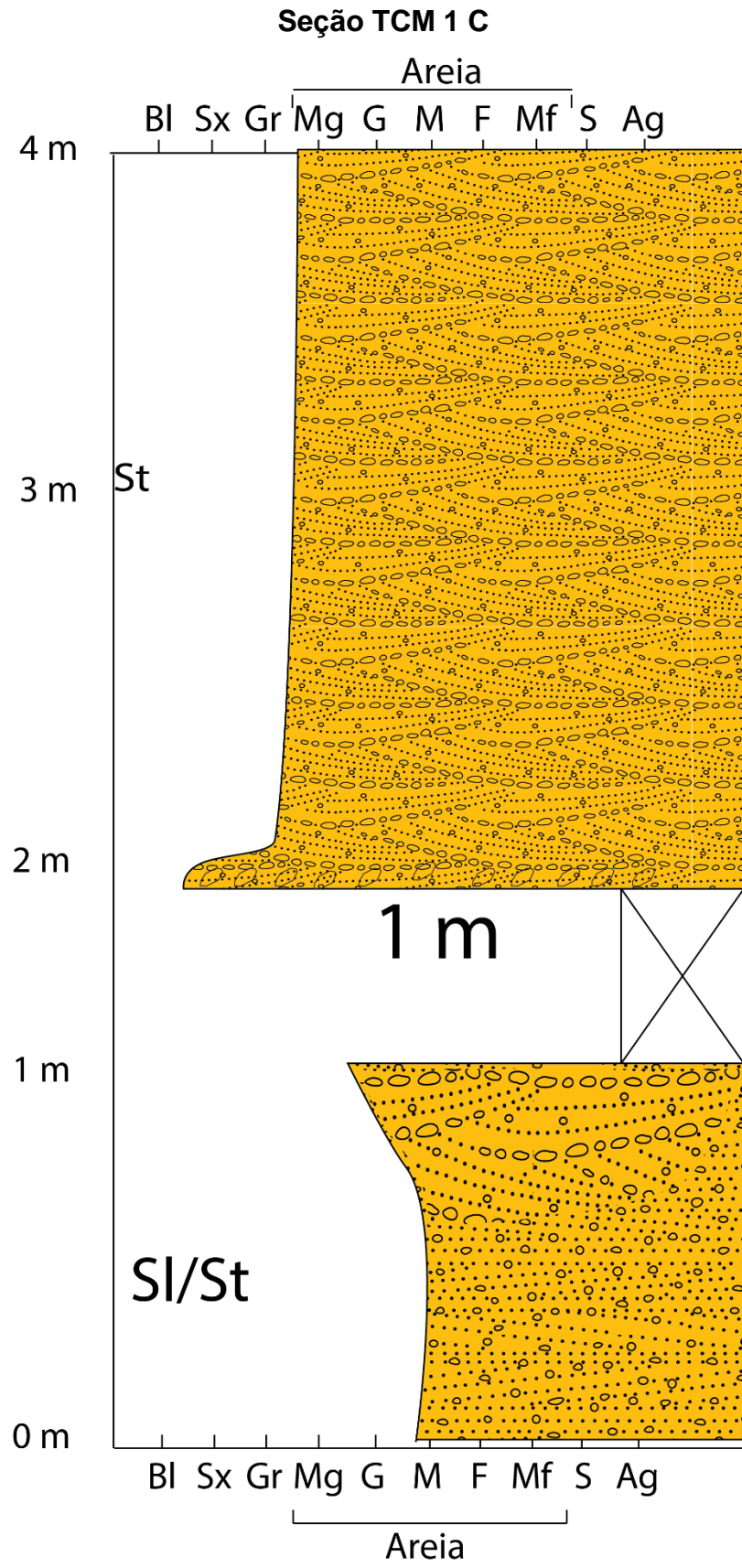
WILDNER, W. et al. **Volcanic cycles and setting in the Neoproterozoic III to Ordovician Camaquã Basin succession in southern Brazil: characteristics of post-collisional magmatism.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 118, n. 1-2, p. 261-283, 2002.

ZECCHIN, Massimo; CATUNEANU, Octavian. **High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: Units and bounding surfaces.** *Marine and Petroleum Geology*, [s. l.], n. 39, p. 1-25, 2013.

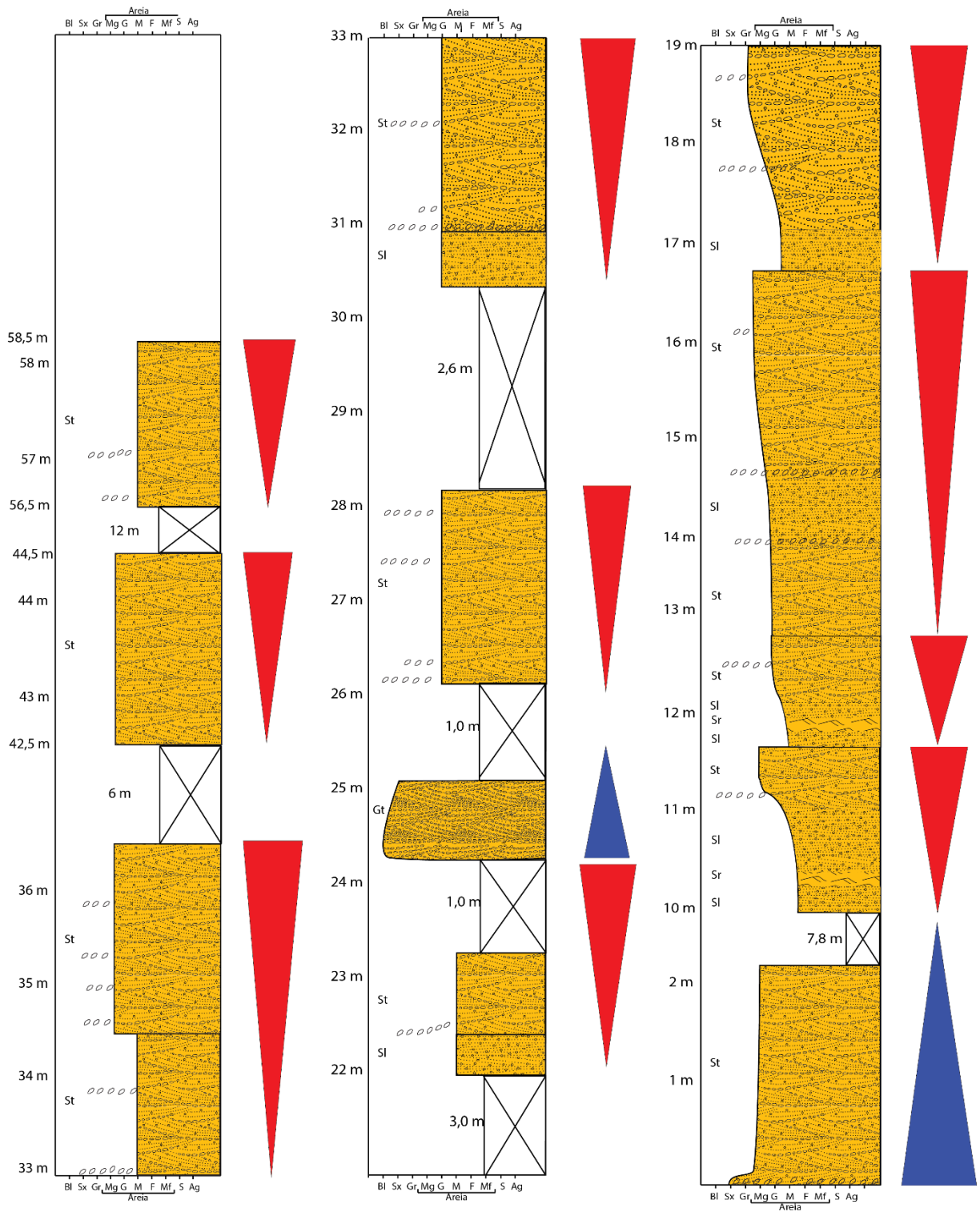
APÊNDICE A

Seção TCM 1

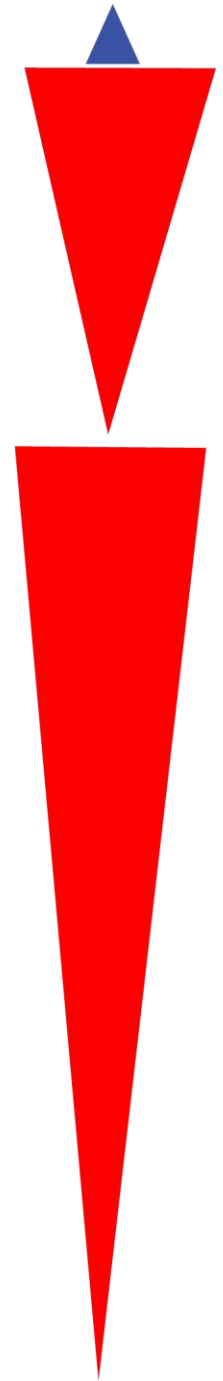
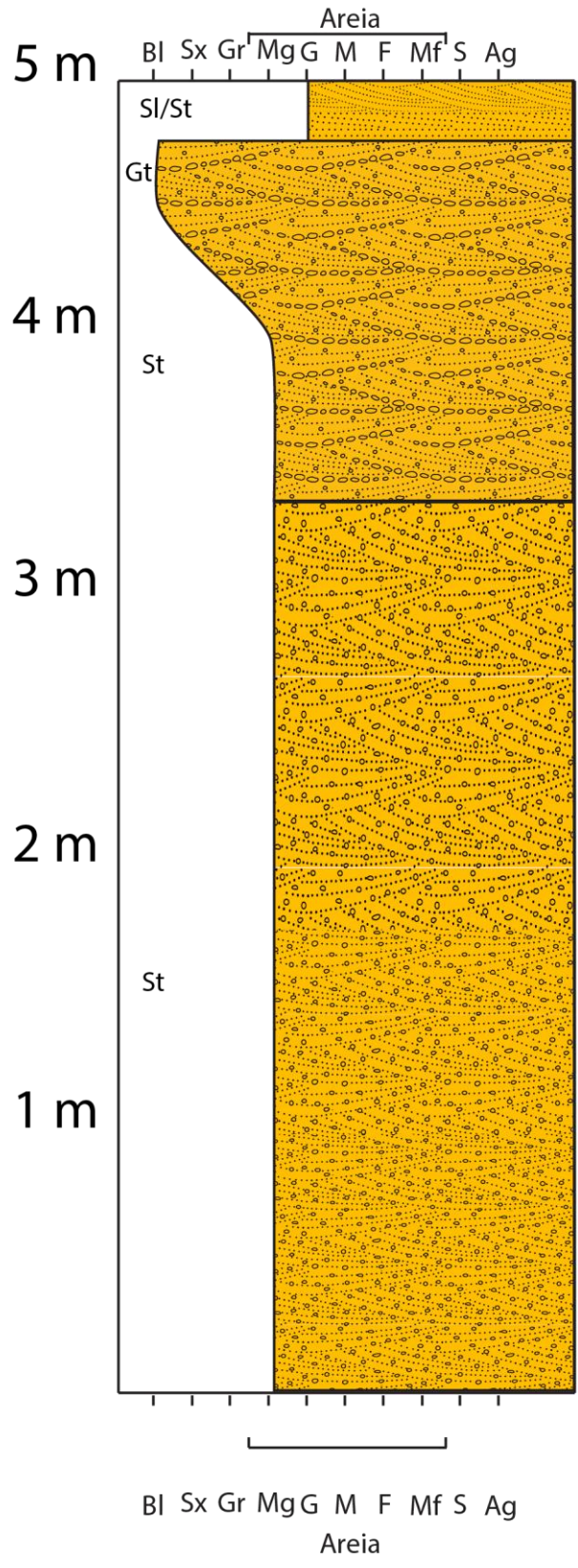




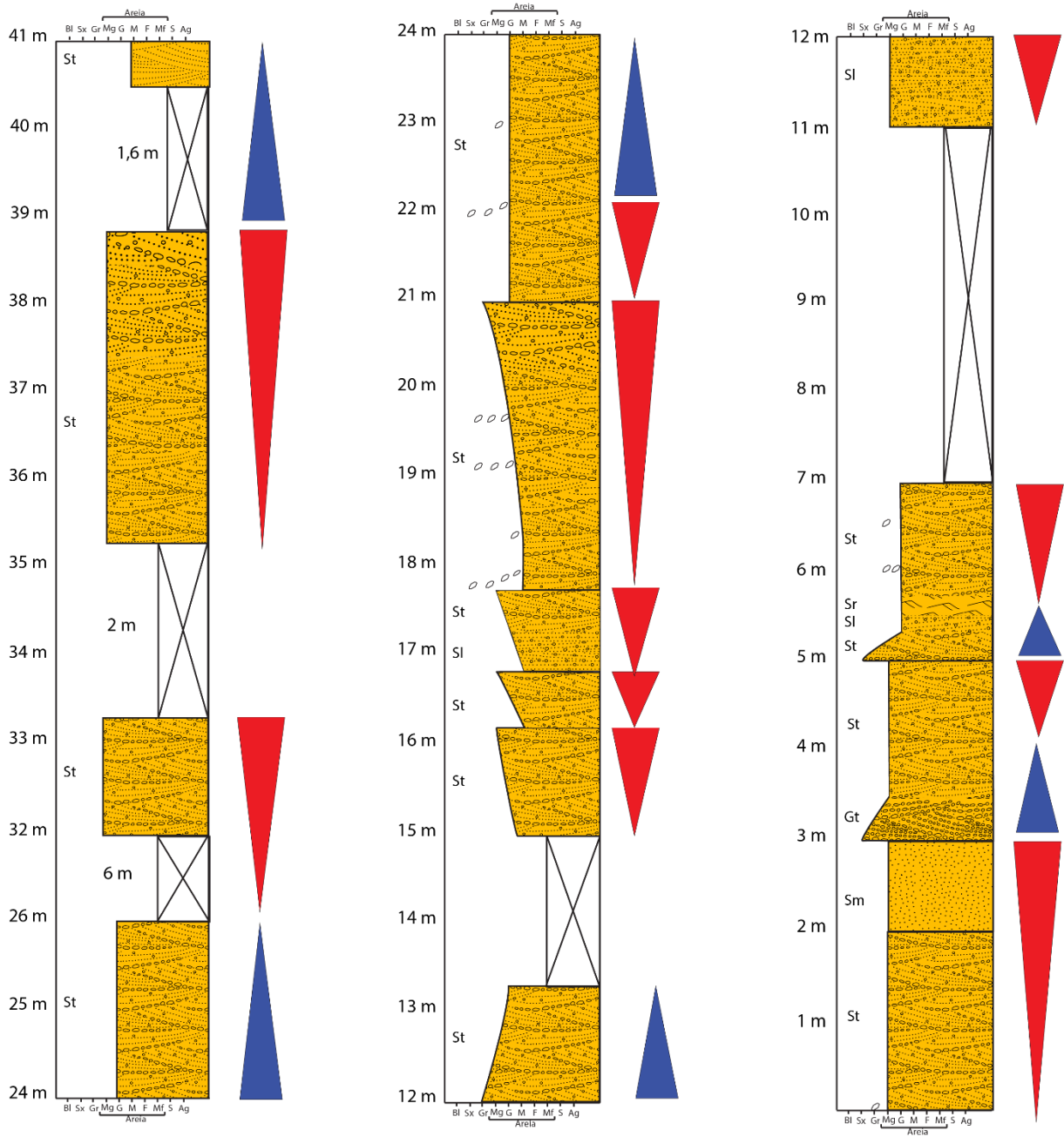
Seção TCM B



Seção TCM 1 D



Seção TCM 2 A



Seção TCM 2 B

