

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

ROSSANO DALLA LANA MICHEL

**ARQUITETURA DE FÁCIES E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE SISTEMA
EÓLICO ÚMIDO – FORMAÇÃO PIAUÍ, PENNSILVANIANO DA BACIA DO
PARNAÍBA**

Porto Alegre, 2021

ROSSANO DALLA LANA MICHEL

**ARQUITETURA DE FÁCIES E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE SISTEMA
EÓLICO ÚMIDO – FORMAÇÃO PIAUÍ, PENNSILVANIANO DA BACIA DO
PARNAÍBA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia junto à disciplina de Projeto Temático em Geologia III, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer

Supervisor: Me. Carrel Kifumbi

Porto Alegre, 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Michel, Rossano Dalla Lana
ARQUITETURA DE FÁCIES E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE
SISTEMA EÓLICO ÚMIDO - FORMAÇÃO PIAUÍ, PENNSILVANIANO
DA BACIA DO PARNAÍBA / Rossano Dalla Lana Michel. --
2021.

76 f.

Orientador: Claiton Marlon dos Santos Scherer.

Coorientador: Carrel Kifumbi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1. Sistema eólico úmido. 2. Formação Piauí. 3.
Pensilvaniano. 4. Modelo Virtual de Afloramento. 5.
Estratigrafia. I. Scherer, Claiton Marlon dos Santos,
orient. II. Kifumbi, Carrel, coorient. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ARQUITETURA DE FÁCIES E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE SISTEMA EÓLICO ÚMIDO – FORMAÇÃO PIAUÍ, PENNSILVANIANO DA BACIA DO PARNAÍBA** elaborado por **Rossano Dalla Lana Michel**, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Dr. Daniel Bayer da Silva

Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza

Prof. Dr. Juliano Kuchle

Dedico este trabalho à memória de minha amada mãe!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço por conseguir concluir esse trabalho em meio a pandemia de COVID-19, a maior pandemia que esse país já vivenciou.

Agradeço a minha família, pilar de toda minha construção. Agradeço imensamente a meu pai, Paulo Michel, por todo esforço, apoio e confiança depositados em mim ao longo de toda a vida. Muito obrigado pai, te amo muito! Agradeço a minha irmã, Patrícia, que devido as circunstâncias da vida, fez papel de mãe desde cedo, por quem carrego profunda admiração e respeito pela grande mulher que és! Agradeço também a essa irmã por ter nos presenteado com minhas duas sobrinhas maravilhosas, Carolina e Marina, que trazem tanta alegria. Agradeço ao meu irmão, Gean, meu melhor amigo e fonte de inspiração, que igualmente não hesitou em me auxiliar e apoiar da maneira que fosse possível! Facilitou minha caminhada com todo o apoio dado. Agradeço também aos maninhos mais novos, Julinha, Pedro e Joaquim, que apesar do convívio reduzido, são igualmente fonte de alegria e motivação. Amo incondicionalmente todos vocês, e não medirei esforços para retribuir um pouco do bem vocês me fazem.

Agradeço a minha parceira, Thaís! Namorada, companheira, amiga e confidente. Igualmente não mediu esforços buscando me ver bem, me auxiliar, tornando a vida diária um pouco mais leve. Amo você!

Agradeço aos salvadores desse trabalho, meu orientador Claiton e meu supervisor Carrel, pela parceria, oportunidade, auxílio e paciência. Agradeço a todos da estrati. Em especial aos queridos Adri e João, que tornaram-se grandes amigos, e ao Alemão e Carlinhos, que além de parceiros tornam as tarefas mais simples com sua dedicação.

Agradeço a todos os amigos que alegraram ou alegram o dia a dia. Aos das antigas, Zé, Franco e Hugão, ao de floripa Marco, aos de Caçapava, Lukita, Egon, Rodrigo e Athos, aos da R.I.P., Edu, Tulio e Japa, aos parceiros da Faixa 5, Cassi, Douglas e Drago, aos colegas Bruno, Paul, Brose, Dodó, Léo e Link. Enfim, a todos que passaram e marcaram presença.

Um agradecimento especial ao Masato, que tanto me ensinou sobre diversos temas, mas especialmente sobre a vida, a importância da pesquisa e a necessidade intrínseca de todo ser de ajudar a sociedade.

Não posso deixar de agradecer à instituição que me proporcionou grande parte da minha formação e a todos os professores que tornaram a teoria da sala de aula uma realidade prática. À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, meu obrigado. Desejo que siga sendo pública e oferecendo altíssima qualidade em todos os quesitos, assim como és!

A tudo e a todos, muito obrigado!

RESUMO

Sistemas deposicionais eólicos apresentam uma gama de estruturas características e podem ser classificados em secos, úmidos ou estabilizados. Sistemas eólicos úmidos apresentam uma ampla variedade de estruturas sedimentares e heterogeneidades sedimentológicas. A análise da arquitetura de fácies destes sistemas deposicionais permite o entendimento da evolução e preservação destes tipos de sistema no registro geológico. A Formação Piauí é composta por ambiente deposicional fluvial desértico litorâneo, datando do período Pensilvaniano, pertencente ao Grupo Balsas da Bacia do Parnaíba. Diante disso, foi realizado o levantamento estratigráfico de alta resolução a partir da união de diversos métodos - levantamento de perfis colunares em escala 1:50, imageamento com VANT, geração e interpretação de painéis laterais e geração de modelo virtual de afloramento (MVA), visando a definição do arcabouço estratigráfico e caracterização da porção aflorante da Formação Piauí, na região central do município de Amarante/PI. Foram levantados 6 perfis colunares e descritos 5 painéis laterais que permitiram a identificação de 10 fácies agrupadas em 4 associação de fácies: dunas eólicas, interdunas úmidas, fluvial confiando e lençol de areia. As paleocorrentes medidas nos *sets* de dunas mostram um padrão de paleoventos predominantemente para NW para o intervalo estudado. Foram identificadas duas supersuperfícies eólicas que permitiram a compartimentação do intervalo em três unidades genéticas, separando o intervalo estudado em três eventos de acumulação separados por dois eventos de deflação. A interpretação desse sistema permitiu interpretar que estão preservados estratos de dunas eólicas crescentes de crista sinuosa (dunas crescentes), com baixa variabilidade de direção de incidência de ventos e propriedades deposicionais características de um sistema eólico úmido, com influência da proximidade do lençol freático da superfície de acumulação.

Palavras-Chave: Sistema eólico úmido, Formação Piauí, Pensilvaniano, Modelo Virtual de Afloramento.

ABSTRACT

Aeolian depositional systems show a range of structures and can be classified as dry, wet or stabilized. Wet aeolian systems present a wide variety of sedimentary structures and sedimentological heterogeneities. The analysis of the facies architecture of these depositional systems allows the understanding of the evolution and preservation of these types of systems in the geological record. The Piauí Formation is composed of a coastal-desert-fluvial depositional environment, dating from the Pennsylvania period, belonging to the Balsas Group of the Parnaíba Basin. Therefore, a high-resolution stratigraphic survey was carried out by combining several methods - columnar profiles in a 1:50 scale, imaging with DRONE, generation and interpretation of side panels and generation of a virtual outcrop model (MVA), aiming to define the stratigraphic framework and characterize the outcropping portion of the Piauí Formation, in the central region of the municipality of Amarante/PI. Five columnar profiles were described and five lateral panels that allowed the identification of 9 facies grouped in 4 facies association: aeolian dunes, humid interdunes, fluvial confined and sand sheet. The paleocurrents measured in the dune sets show a pattern of paleowinds dominantly to NW. Two eolian supersurfaces were identified that allowed the compartmentation of the interval into three genetic units, separating the studied interval into three accumulation events separated by two deflation events. The interpretation of this system allowed us to interpret that are preserved strata of transverse aeolian dunes with sinuous crest (crescentic dunes), with low variability of paleowind direction and depositional properties characteristic of a wet aeolian system, influenced by the proximity of the water table to the accumulation surface.

KEY-WORDS: Wet aeolian system, Piauí Formation, Pennsylvanian, Virtual Outcrop Model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO PARNAÍBA (A E B) E DO MUNICÍPIO DE AMARANTE (C E D). NA FIGURA D), O POLÍGONO DESTACADO EM VERMELHO INDICA A ÁREA DE ESTUDO.....	15
FIGURA 2. CARTA CRONOESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARNAÍBA DESTACANDO A FORMAÇÃO PIAUÍ (CAIXA VERMELHA), DA ÉPOCA PENNSILVÂNICO. A FORMAÇÃO É INTERPRETADA COMO SENDO COMPOSTA POR AMBIENTES DEPOSICIONAIS FLUVIAL DESÉRTICO LITORÂNEOS (MODIFICADO DE VAZ <i>ET AL.</i> , 2007).	18
FIGURA 3. MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO PARNAÍBA EVIDENCIANDO A ABRANGÊNCIA DA FORMAÇÃO PIAUÍ (FONTE: ELABORADO PELO AUTOR UTILIZANDO A BASE DE DADOS DA CPRM).	20
FIGURA 4. GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE COMPRIMENTO DE ONDA DAS FORMAS DE LEITO E TAMANHO DOS GRÃOS EVIDENCIANDO UMA HIERARQUIA DE FORMAS DE LEITO EÓLICAS. NOTA-SE A AUSÊNCIA DE FORMAS DE LEITO INTERMEDIARIAS. (MODIFICADO DE WILSON, 1972).....	23
FIGURA 5. CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE ESTRATIFICAÇÃO DE MARCAS ONDULADAS COM BASE NO ÂNGULO DE CAVALGAMENTO E INCLINAÇÃO DO DORSO DAS FORMAS DE LEITO (MODIFICADO DE HUNTER, 1977). .	24
FIGURA 6. DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE DEPÓSITOS EÓLICOS EM UMA DUNA EÓLICA E VISTA DAS ESTRUTURAS INTERNAS QUE COMPÕEM UMA DUNA (MODIFICADO DE HUNTER, 1977).	25
FIGURA 7. (A) CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA DE DUNAS EÓLICAS. ILUSTRAÇÕES SUPERIORES: DUNAS SIMPLES. ILUSTRAÇÃO INFERIOR: <i>DRAAS</i> ; (B) TIPOS MORFODINÂMICOS DE DUNAS, AS SETAS INDICAM O VETOR DO VENTO DE LONGA-DURAÇÃO RELACIONADO A ORIENTAÇÃO DAS LINHAS DE CRISTA DAS DUNAS (LINHAS TRACEJADAS INDICAM VARIAÇÕES DA LINHA DE CRISTA DE $\pm 15^\circ$); (C) VARIAÇÕES DAS ORIENTAÇÕES DE DUNAS SIMPLES, COMPARANDO TIPOS MORFODINÂMICOS E MORFOLÓGICOS (MODIFICADO DE KOCUREK, 1991).	26
FIGURA 8. TIPOS MORFOLÓGICOS DE DUNAS ILUSTRADO TRIDIMENSIONALMENTE. SETAS CONTÍNUAS INDICAM AS DIREÇÕES DOS VENTOS, A SETA PONTILHADA INDICA A DIREÇÃO DE VENTO RESULTANTE. (EXTRAÍDO DE MOUNTNEY, 2006B).....	27
FIGURA 9. RELAÇÃO ENTRE SUPRIMENTO SEDIMENTAR E RESULTANTE DA DIREÇÃO DE VENTO NOS TIPOS DE DUNAS (EXTRAÍDO DE NICHOLS, 2009)	28
FIGURA 10. SEQUÊNCIA IDEALIZADA DE ESTRUTURAS ASSOCIADAS A DEPÓSITOS DE INTERDUNAS EÓLICAS. EXEMPLO DE UMA SUCESSÃO COM PROGRESSIVA DIMINUIÇÃO DE UMIDADE EM DIREÇÃO AO TOPO (RETIRADO DE JONES, 2012, MODIFICADO DE KOCUREK, 1981).	32
FIGURA 11. MODELOS ILUSTRANDO A GEOMETRIA DAS SUPERFÍCIES DE REATIVAÇÃO, SUPERIMPOSIÇÃO, MIGRAÇÃO DE INTERDUNA E SUPERSUPERFÍCIES EM SISTEMAS EÓLICOS. (EXTRAÍDO DE MOUNTNEY, 2006B).....	34
FIGURA 12. RELAÇÕES ENTRE FÁCIES, ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES E SISTEMAS DEPOSICIONAIS (ADAPTADO DE WALKER & JAMES (1992)).	38
FIGURA 13. A) IMAGEM AÉREA DA REGIÃO DOS AFLORAMENTOS, AS BARRAS INDICAM A POSIÇÃO APROXIMADA DOS PAINÉIS LATERAIS; B) FOTOGRAFIA CAPTURADA COM VANT DO AFLORAMENTO ESTUDADO. OS NUMERAIS INDICAM OS LOCAIS DE LEVANTAMENTO DE SEÇÕES E PERFIS NOS QUAIS FORAM DESCRITOS E INTERPRETADOS PAINÉIS LATERAIS. ORIENTAÇÕES DOS PAINÉIS – 001: 160-340; 002: 030-210; 002A: 152-332; 002B: 090-270; E 003: 144-324.	40
FIGURA 14. FOLHA-BASE DO PROJETO PARA LEVANTAMENTO E DESCRIÇÃO DE SEÇÕES COLUNARES.....	41
FIGURA 15. FIGURA MOSTRANDO AS POSIÇÕES DAS FOTOGRAFIAS EM RELAÇÃO AO AFLORAMENTO. A) OS PONTOS BRANCOS REPRESENTAM O PONTO DE ONDE A FOTOGRAFIA FOI TIRADA (VISTA EM PLANTA); B) MOSTRA A NUVEM DE PONTOS ESPARSA DO AFLORAMENTO, GERADA A PARTIR DAS FOTOGRAFIAS; E EM C) A RELAÇÃO ENTRE O AFLORAMENTO ESTUDADO E AS FOTOGRAFIAS OBTIDAS COM VANT.....	44
FIGURA 16. ALGORITMO PARA GERAÇÃO DE MODELOS A PARTIR DAS FOTOGRAFIAS (MDS = MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE, MDT = MODELO DIGITAL DE TERRENO, E MVA = MODELO VIRTUAL DE AFLORAMENTO).	46
FIGURA 17. MVA COM SUPERFÍCIES GERADAS DENTRO DO SOFTWARE <i>PETEX MOVE</i> ® A PARTIR DA INTERPOLAÇÃO DE SUPERFÍCIES INTERPRETADAS EM CAMPO E IDENTIFICADAS NO MODELO 3D.	47
FIGURA 18. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE DUNAS EÓLICAS. (A) ALTERNÂNCIA ENTRE ASSOCIAÇÕES DE FÁCIES DE DUNAS E INTERDUNAS EÓLICA DEMONSTRANDO A RELATIVA CONTINUIDADE LATERAL DOS DEPÓSITOS; (B) GRADAÇÃO INVERSA; (C)CORTE TRANSVERSAL A DIREÇÃO DE MIGRAÇÃO DA DUNA DEMONSTRANDO A INTERCALAÇÃO ENTRE DEPÓSITOS DE FLUXO E QUEDA DE GRÃOS (LINHA TRACEJADA VERDE (ST (E))), E ACUNHAMENTO DESSES DEPÓSITOS EM DIREÇÃO AO PÉ DA DUNA (LINHA TRACEJADA AMARELA). A SETA AMARELA INDICA DEPÓSITOS DE <i>RIPPLES</i> EÓLICAS NO PÉ DA DUNA (SL (E)); (D) A LINHA TRACEJADA EM PRETO REPRESENTA UMA SUPERFÍCIE DE REATIVAÇÃO (3ª ORDEM) EM UM SET DE DUNA EÓLICA.....	51

FIGURA 19. ASSOCIAÇÃO DE INTERDUNAS. A) CONTATO DEFORMADO ENTRE INTERDUNA E DUNA; B) LAMINAÇÃO <i>PINSTRIFE</i> E DE BAIXO ÂNGULO OU HORIZONTAIS DE MIGRAÇÃO DE ESTRATOS TRANSLADANTES; C) RELAÇÃO ENTRE DUNA E INTERDUNA MOSTRANDO A BASE DA DUNA DEFORMADA E O TOPO DA DUNA COM FEIÇÃO DE EROÇÃO E PREENCHIMENTO (SETA AMARELA, ZOOM NA FIGURA D).	53
FIGURA 20. ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES DE LENÇOL DE AREIA. A) CONTATO ENTRE O TOPO DA DUNA INFERIOR E DO LENÇOL DE AREIA. PERCEBE-SE A OCORRÊNCIA DE PEQUENA LENTE DE ESTRATOS CRUZADOS PRÓXIMO A BASE DO LENÇOL DE AREIA. B) LAMINAÇÕES FINAMENTE ESPAÇADAS REPRESENTANDO DEPÓSITOS DE MIGRAÇÃO DE <i>RIPPLES</i> TRANSLADANTES CAVALGANTES; C) NO CENTRO DA IMAGEM PERCEBE-SE FEIÇÕES DE DEFORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS.	54
FIGURA 21. ASSOCIAÇÃO FLUVIAL CONFINADO. A) FÁCIES SL, SR E SS; B) ZOOM NA FÁCIES SL; C) ZOOM NA FÁCIES SR; D) FÁCIES SG E RELAÇÃO COM INTERDUNA SOTOPOSTA; E) FOTOGRAFA DE AMOSTRA DE MÃO DA FÁCIES SG.	56
FIGURA 22. PAINÉIS LATERAIS ELABORADOS E INTERPRETADOS A PARTIR DO MODELO VIRTUAL DO AFLORAMENTO (VER ANEXOS PARA MAIOR DETALHE).	58
FIGURA 23. CORRELAÇÃO DAS SEÇÕES COLUNARES LEVANTADAS, MOSTRANDO AS SUPERSUPERFÍCIES IDENTIFICADAS E A DISTRIBUIÇÃO DAS TRÊS UNIDADES GENÉTICAS.	60
FIGURA 24. A) MODELO EVOLUTIVO PARA O INTERVALO ESTUDADO; B) CURVA DE DEPOSIÇÃO/DEFLAÇÃO VERSUS NÍVEL DO FREÁTICO.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	<i>Objetivos</i>	<i>13</i>
1.2	<i>Justificativa</i>	<i>13</i>
2	ÁREA DE ESTUDO	15
2.1	<i>Contexto Geológico.....</i>	<i>16</i>
2.1.1	<i>Bacia do Parnaíba</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Formação Piauí.....</i>	<i>19</i>
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1	<i>Sistemas eólicos</i>	<i>21</i>
3.1.1	<i>Erosão, transporte e deposição eólica</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Formas de leito Eólicas.....</i>	<i>22</i>
3.1.3	<i>Áreas de Interdunas</i>	<i>28</i>
3.1.4	<i>Lençóis de areia</i>	<i>29</i>
3.1.5	<i>Tipos de Sistemas Eólicos</i>	<i>29</i>
3.2	<i>Depósitos Eólicos no Registro Geológico.....</i>	<i>30</i>
3.2.1	<i>Elementos arquiteturais</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Superfícies limítrofes.....</i>	<i>33</i>
3.2.3	<i>Interações com sistemas adjacentes.....</i>	<i>36</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	<i>Revisão Bibliográfica.....</i>	<i>38</i>
4.2	<i>Trabalho de Campo.....</i>	<i>39</i>
4.2.1	<i>Levantamento de seções colunares</i>	<i>40</i>
4.2.2	<i>Imageamento com VANT.....</i>	<i>42</i>
4.2.1	<i>Painéis Laterais.....</i>	<i>45</i>
4.3	<i>Laboratório</i>	<i>45</i>
4.3.1	<i>Modelos Virtuais de Afloramento (MVA)</i>	<i>45</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	<i>LITOFÁCIES.....</i>	<i>48</i>
5.2	<i>ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES</i>	<i>50</i>
5.2.1	<i>Associação de Fácies de Dunas Eólicas</i>	<i>50</i>
5.2.2	<i>Associação de Fácies de Interdunas.....</i>	<i>52</i>
5.2.3	<i>Associação de Fácies de Lençóis de Areia</i>	<i>53</i>
5.2.4	<i>Associação de Fácies de Depósitos Fluviais.....</i>	<i>55</i>
5.3	<i>PAINÉIS LATERAIS (MVA).....</i>	<i>57</i>
5.4	<i>UNIDADES GENÉTICAS.....</i>	<i>59</i>
5.5	<i>MODELO E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA</i>	<i>62</i>
6	CONCLUSÕES.....	64
	REFERÊNCIAS	65
	ANEXOS	70
	<i>Anexo 1: Perfis colunares digitalizados.</i>	<i>70</i>
	<i>Anexo 2: Painéis laterais elaborados e interpretados a partir do Modelo Virtual do Afloramento.</i>	<i>70</i>

1 INTRODUÇÃO

Os processos eólicos são extremamente efetivos em regiões de baixa umidade e por consequência com menos vegetação. Constituem complexos depósitos sedimentares que podem apresentar extensão de poucos a centenas de quilômetros quadrados de extensão e diferenças laterais nos processos sedimentológicos atuantes em decorrência de mudanças nas condições do entorno e interação com diferentes sistemas deposicionais.

Depósitos de sedimentos eólicos, sejam eles antigos ou modernos, apresentam grande diversidade e constituem monumentos de grande beleza cênica, devido essencialmente às estruturas sedimentares e formas geradas quando da deposição desses sedimentos. Como exemplo pode-se citar o deserto da Namíbia, na África; depósitos de dunas eólicas costeiras, na costa do estado do Rio Grande do Sul; Lençóis Maranhenses, no nordeste do Brasil; rochas do platô Cedar Mesa, no estado de Utah, nos Estados Unidos.

Sistemas eólicos podem ser subdivididos em secos, úmidos ou estabilizados, e explicados em termos da dinâmica das dunas eólicas, da taxa de variação do lençol freático, da disponibilidade de sedimentos e do regime de ventos incidentes. A Formação Piauí, definida por Small (1914), está localizada na Bacia do Parnaíba, foi depositada em ambiente fluvial com intercalações com depósitos eólicos, apresentando um aumento de aridez e algumas interações com depósitos litorâneos para o topo.

A dinâmica dos sistemas eólicos é condicionada pela relação entre a disponibilidade de areia, o nível do freático e os regimes de vento. Os sistemas úmidos são controlados pela proximidade entre a superfície deposicional e o nível do lençol freático, onde a presença de água diminui o potencial erosivo do vento e a disponibilidade de sedimentos, e possibilita o desenvolvimento de diversas estruturas deposicionais, tanto eólicas como subaquosas. A presença de água no sistema, pode também modificar a dinâmica de desenvolvimento e preservação de um campo de dunas.

O presente trabalho visa realizar a análise da arquitetura de fácies e de estratigrafia de alta resolução, permitindo o entendimento dos processos de desenvolvimento, acumulação e preservação de sistemas eólicos. O principal objetivo consiste na

interpretação e compreensão dos processos e a evolução de um depósito eólico úmido do período Carbonífero, através da aplicação de conceitos de sedimentologia e estratigrafia em um afloramento na região central do município de Amarante/PI.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é, através do estudo de caso da Formação Piauí (Carbonífero da Bacia do Parnaíba), compreender os processos atuantes durante as fases de desenvolvimento, acumulação e preservação do sistema eólico úmido, através da reconstrução da evolução estratigráfica do sistema estudado.

Logo, como objetivos específicos, pretende-se realizar:

- (I) A identificação e caracterização de fácies e superfícies-chave para definição de sucessão e associação de fácies e definição dos sistemas deposicionais;
- (II) Definir os padrões de vento atuantes durante a acumulação do depósito;
- (III) A reconstrução morfológica e morfodinâmica das dunas;
- (IV) Definir o tipo de sistema eólico, suas variações e interações com outros sistemas;
- (V) Entender os mecanismos controladores da acumulação e preservação;
- (VI) Construção de um modelo estratigráfico de cada unidade eólica e um modelo evolutivo do sistema preservado no registro geológico.

1.2 Justificativa

Depósitos sedimentares eólicos possuem ainda a importância de serem potenciais reservatórios tanto de água subterrânea quanto de hidrocarbonetos. A identificação, detalhamento e entendimento desses depósitos bem como dos processos envolvidos

durante sua evolução, e a relação com outros ambientes sedimentares permite uma melhor compreensão de potenciais fontes desses recursos naturais.

Além disso, as respostas dos sistemas eólicos às mudanças nos parâmetros controladores como suprimento sedimentar, disponibilidade sedimentar, variações no lençol freático, e regime de ventos podem ser reconhecidos através do minucioso entendimento do registro geológico (Mountney, 2006a). Assim, a reconstrução evolutiva do sistema deposicional preservado no registro permite inferir as variações das condições operantes durante a construção destes sistemas.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região central do município de Amarante, centro-norte do estado do Piauí, 160 km ao sul da capital Teresina (Figura 1). No local afloram depósitos predominantemente eólicos pertencentes a Formação Piauí.

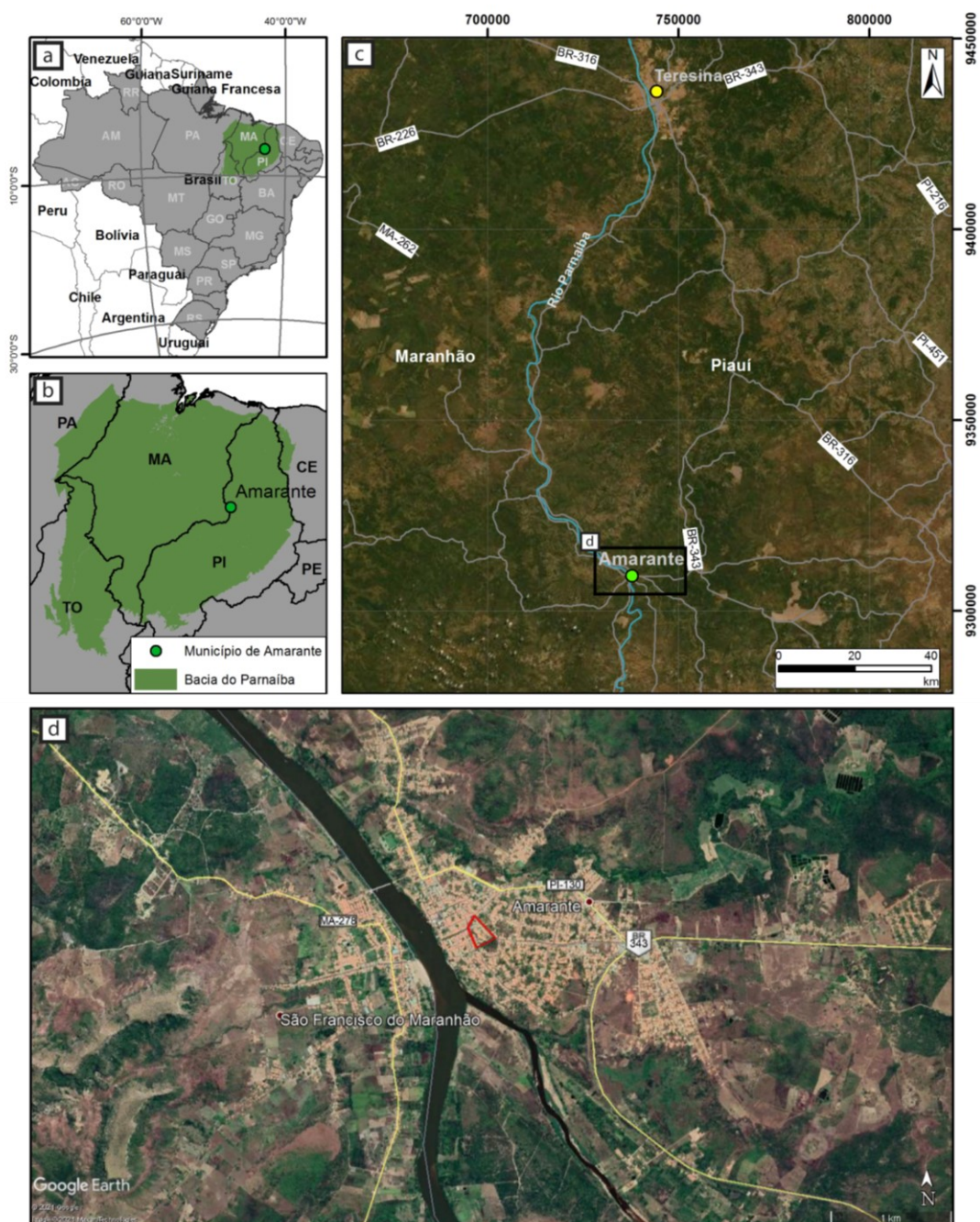


Figura 1. Localização da Bacia do Parnaíba (a e b) e do município de Amarante (c e d). Na figura d), o polígono destacado em vermelho indica a área de estudo.

2.1 Contexto Geológico

2.1.1 Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba, antes chamada de Meio-Norte, Maranhão ou Piauí-Maranhão, está localizada no Nordeste do Brasil entre os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Tocantins e Pará, ocupando uma área de aproximadamente 600 mil km² (Vaz *et al.*, 2007). Os limites da bacia são o Arco Ferrer-Urbano Santos ao norte, o arco de Tocantins a noroeste, e depósitos correlatos à faixa de dobramento Brasília a sul e a sudeste (Cunha, 1986). Esforços exploratórios na bacia foram focados em carvão e hidrocarbonetos, principalmente nas décadas de 1960 e 1970, pelo DNPM (Departamento Nacional de Pesquisa Mineral), CPRM (Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais – atual Serviço Geológico do Brasil) e Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), gerando grande parte das informações geológicas disponíveis da bacia.

Trata-se de uma bacia Paleozoica de interior cratônico classificada como uma bacia do tipo *sag* podendo alcançar até 3,5 km de espessura no seu depocentro (Milani & Thomaz Filho, 2000; Vaz *et al.*, 2007), desenvolvida sobre um embasamento continental durante a estabilização da Plataforma Sul-Americana, com a origem da subsidência ligada a processos tardi- a pós-orogênicos do Ciclo Brasileiro (Almeida & Carneiro, 2004). O depocentro da bacia teria sido controlado inicialmente por estruturas grabeniformes (Oliveira & Mohriak, 2003).

A bacia apresenta feições morfo-estruturais de grande escala importantes durante seu desenvolvimento, podendo-se citar os lineamentos Picos-Santa Inês, Marajó-Parnaíba (ambos NW-SE) e o Lineamento Transbrasiliano (NE-SW), este último que controlou parte da fase inicial de desenvolvimento da bacia e também dos eixos deposicionais.

A Bacia do Parnaíba desenvolveu-se ao longo de um período de aproximadamente 500 Ma, com o registro sedimentar sendo disposto em cinco supersequências (Vaz *et al.*, 2007) com os respectivos correspondentes litoestratigráficos: (I) Siluriana: Grupo Serra Grande; (II) Mesodevoniana-Eocarbonífera: Grupo Canindé; (III)

Neocarbonífera-Eotriássica: Grupo Balsas; (IV) Jurássica: Formação Pastos Bons; e (V) Cretácea: Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru.

O Grupo Balsas, proposto por Goes et al. (1990) abrange quatro formações. A Formação Piauí, composta por depósitos fluviais, desérticos e litorâneos, data do Neocarbonífero e compõem a parte basal do grupo; a Formação Pedra de Fogo data do Permiano e é composta por depósitos de tempestades, plataformais rasos, litorâneos e de *sabkha*; a Formação Motuca data do Eotriássico e é composta por depósitos desérticos e lacustres; e a Formação Sambaíba, que marca o fim do Grupo Balsas é Mesotriássica e composta por depósitos desérticos (Figura 2). O grupo perfaz cerca de 1.300 m de espessura na região mais espessa e sua evolução estratigráfica associada a sinéclise pós orogênia Eo-Herciniana (Vaz *et al.*, 2007).

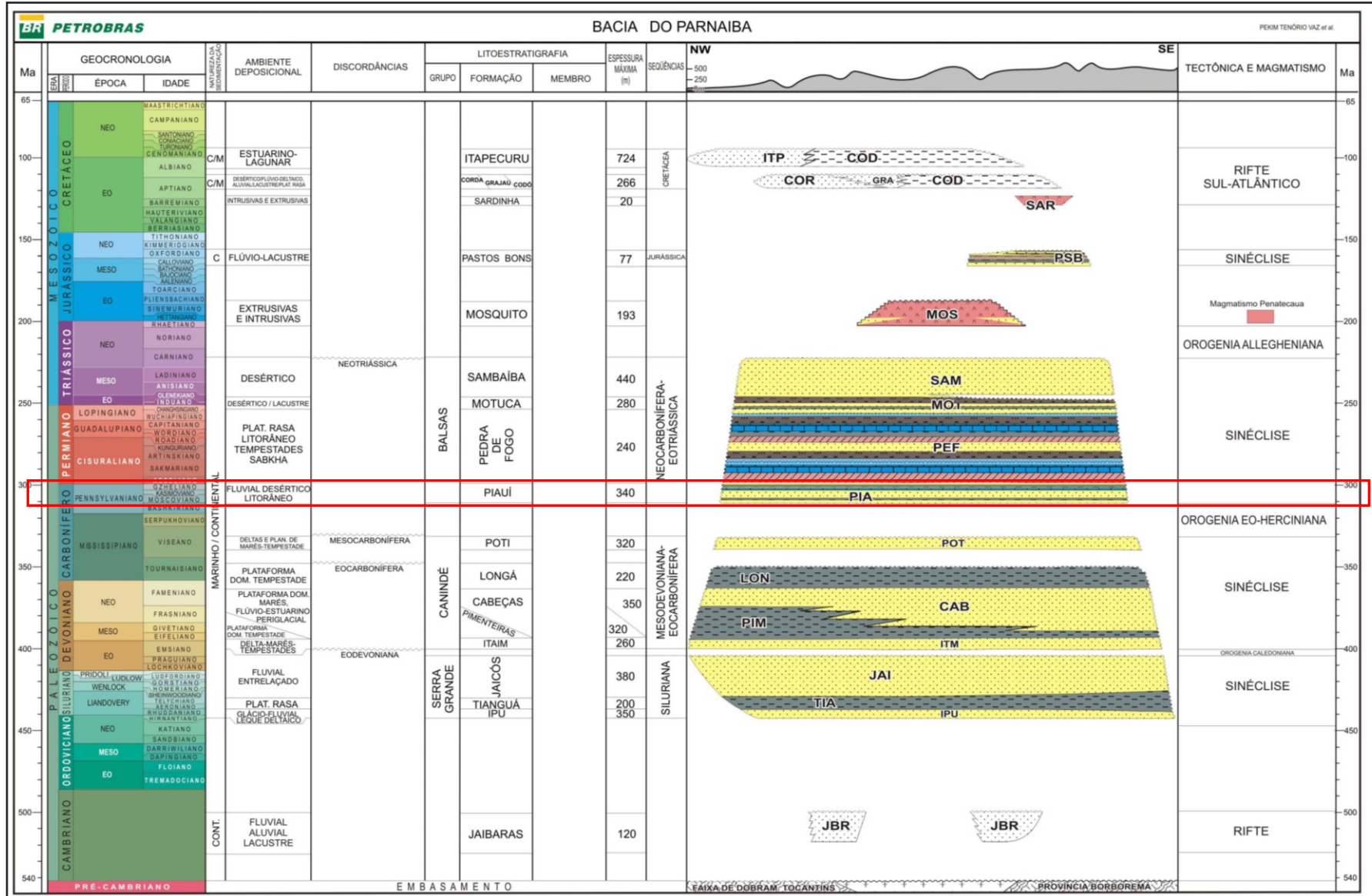


Figura 2. Carta cronoestratigráfica da Bacia do Parnaíba destacando a Formação Piauí (caixa vermelha), da época Pensilvaniano. A formação é interpretada como sendo composta por ambientes deposicionais fluvial desértico litorâneos (modificado de Vaz et al., 2007).

2.1.2 Formação Piauí

A Formação Piauí foi definida por Small (1914), sendo chamada inicialmente de Série Piauí. Corresponde a uma sequência sedimentar predominantemente clástica, abrange grande extensão na bacia e aflora em uma faixa localizada ao longo das margens sul, sudeste e leste da bacia (Lima Filho, 1991), como visto na figura 3. A unidade, com idade Pensilvaniana, foi depositada em um ambiente fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, em clima semiárido e desértico, com condições de aridez aumentando para o topo da formação (Lima Filho, 1991). Recentemente foram identificados também depósitos de plataforma carbonática, delta e marés na Formação Piauí, além da caracterização dos depósitos eólicos como sendo costeiros (Lima Filho, 1998).

Lima & Leite (1978) subdividiram a formação em duas sucessões estratigráficas: uma inferior e uma superior, com base na subdivisão em membros por Mesner & Wooldridge (1964). A primeira é composta por arenitos rosados, médios, maciços ou com estratos cruzados de grande porte e intercalação com folhelhos; o segundo é composto por arenitos vermelhos e amarelos, finos a médios, intercalando-se com folhelhos vermelhos, calcários, calcarenitos, evaporitos e finas camadas de sílex (Caputo, 1984).

O contato inferior entre Fm. Piauí e Fm. Potí é erosivo e envolve movimentos epirogênicos ascendentes e regressão de extensão global, relacionados à Orogênese Eo-herciniana (Caputo, 1984). O contato superior, com a Formação Pedra de Fogo, é concordante gradacional e marca o afogamento por depósitos marinhos e costeiros em condições de clima árido e semiárido como consequência de um pulso inicial transgressivo (Barbosa *et al.*, 2016).

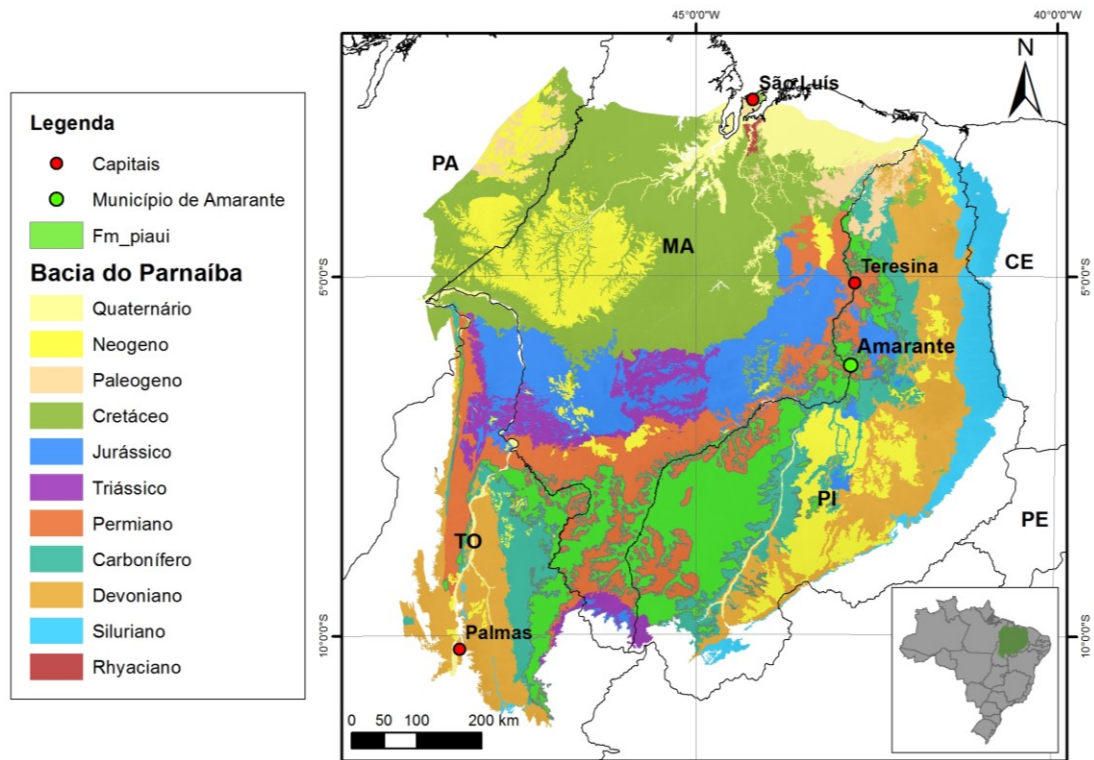


Figura 3. Mapa geológico da Bacia do Parnaíba evidenciando a abrangência da Formação Piauí (fonte: elaborado pelo autor utilizando a base de dados da CPRM).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas eólicos

Ambientes deposicionais eólicos são domínios fisiogeográficos aonde os processos de erosão, transporte e deposição têm como principal agente geológico o vento, ocorrendo na superfície do planeta Terra. Os depósitos eólicos podem confundir-se em algumas estruturas com depósitos fluviais ou marinhos, exigindo assim uma minuciosa interpretação das características litofaciológicas presentes no sistema para uma correta definição dos processos geradores de tal depósito.

3.1.1 Erosão, transporte e deposição eólica

A erosão eólica é pouco eficiente como erosão primária de rochas, devido à baixa viscosidade do fluido. Porém, devido à grande área de ação do vento, este consegue transportar grande quantidade de sedimentos inconsolidados (Scherer, 2004). Dois são os principais processos erosivos causados pelo vento: a deflação e a abrasão.

A deflação consiste em remoção e transporte pelo vento de grãos de tamanho silte e areia, podendo gerar por exemplo, pavimentos aplainados de desertos (*lag* de deflação) compostos por sedimentos grossos que não puderam ser erodidos pela deflação. Já a abrasão eólica é resultado do atrito de partículas transportadas pelo vento contra alguma superfície, causando o desgaste dessa superfície pelo continuado impacto, gerando por exemplo ventifactos, que são sedimentos de granulometria grossa que apresentam faces aplainadas direcionadas contra o vento dominante.

Os mecanismos de transporte de sedimento pela ação do vento podem ser classificados em: saltação, suspensão e rastejamento (Bagnold, 1941). O rastejamento ocorre quando as partículas possuem diâmetro próximo ao limiar da capacidade de transporte pelo vento (areia grossa a grânulos), sendo muito grandes para serem colocadas em suspensão ou saltação. Essas partículas são movimentadas junto a superfície do terreno, por arrasto e rolamento das partículas.

O processo de saltação envolve partículas tamanho areia fina a média, e ocorre com a colocação dos grãos em movimento suspenso carregados pelo vento com subsequente impacto contra a superfície pela ação da gravidade, em um curto intervalo de tempo. Quando em movimento suspenso os grãos ainda podem chocar-se entre si, promovendo uma maior permanência suspensão antes de impactarem novamente a superfície (Mountney, 2006b).

A suspensão envolve partículas de granulometria fina (silte e argila), onde o transporte ocorre usualmente como carga suspensa, onde as partículas podem ser carregadas por longas distâncias. O processo de suspensão irá gerar depósitos de *loess*, que são acumulações de sedimentos finos transportados pelo vento, que ocorrem em regiões distais de depósitos eólicos, aonde o vento é menos efetivo.

Os processos de deposição eólicos geram basicamente os seguintes depósitos eólicos: depósitos de migração e cavalgamento de marcas de onda eólicas; depósitos de fluxo de grãos (*grainflow*); depósitos de queda livre de grãos (*grainfall*) e depósitos gerados por processos de adesão em sistemas úmidos.

3.1.2 Formas de leito Eólicas

Wilson (1972) hierarquiza as formas de leito eólicas em marcas onduladas, dunas e *draas*, que se diferenciam pelo comprimento de onda e conseqüente dimensão da forma de leito (Figura 4). Lancaster (1988) definiu que tais formas de leito se desenvolvem de forma independente em resposta a diferentes fatores, como: regime de vento, taxa de acumulação de sedimentos e tamanho dos grãos. A formação das diferentes hierarquias está associada com a escala temporal de incidência dos processos formadores. De acordo com Lancaster (1988), o desenvolvimento de marcas onduladas eólicas é controlado pela variabilidade em um curto intervalo de tempo, horas ou dias, dos eventos dinâmicos formacionais. Dunas possuem escala temporal de formação regrada por variações sazonais na velocidade e sentido dos ventos formadores, com um tempo de reconstituição na ordem de 10 a 100 anos enquanto os *draas* respondem apenas a intervalos temporais na ordem de grandeza de 1.000 a 100.000 anos de tempo de reconstituição.

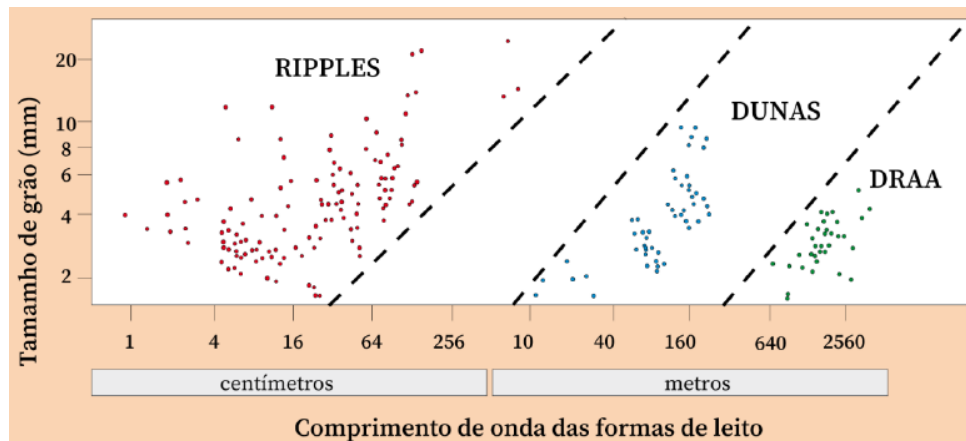


Figura 4. Gráfico de dispersão entre comprimento de onda das formas de leito e tamanho dos grãos evidenciando uma hierarquia de formas de leito eólicas. Nota-se a ausência de formas de leito intermediárias. (modificado de Wilson, 1972).

3.1.2.1. Marcas Onduladas

Marcas onduladas eólicas são estruturas de poucos centímetros de altura com comprimento de onda entre 20 e 200mm que tipicamente apresentam a linha de crista perpendicular à direção do vento incidente (Mountney, 2006b). Podem ser compostas por grãos de tamanho areia ou grânulos (*granule ripples*) e são geradas pela saltação e rastejamento ao longo do substrato. Podem desenvolver-se em lençóis de areia, regiões interdunas ou nas faces de dunas e *draas*. Usualmente estas formas de leito cavalgam umas sobre as outras formando um ângulo de cavalgamento com um plano horizontal e gerando estratos transladantes cavalgantes. Este ângulo pode variar dependendo do volume de sedimento disponível e a taxa de migração das marcas onduladas. Esta variação irá gerar três tipos de estruturas de marcas onduladas denominadas de supercríticas, críticas e subcríticas (Figura 5), que podem ou não preservar as laminações cruzadas (Hunter, 1977).







		Estruturas transladantes	Laminações das marcas onduladas
Relação entre o ângulo de cavalgamento (α) e a inclinação do dorso das formas de leito (β)	Subcrítico ($\alpha < \beta$)	 Estratos transladantes cavalgamento subcrítico	 Laminações cruzadas truncadas
	Crítico ($\alpha = \beta$)	 Estratos transladantes cavalgamento crítico	 Laminações cruzadas inteiramente preservadas
	Supercrítico ($\alpha > \beta$)	 Estratos transladantes cavalgamento supercrítico	 Preservação do dorso e da parte frontal das formas de leito

Figura 5. Classificação do tipo de estratificação de marcas onduladas com base no ângulo de cavalgamento e inclinação do dorso das formas de leito (modificado de Hunter, 1977).

3.1.2.2. Dunas eólicas e *draas*

Dunas eólicas apresentam comprimentos de onda de 3 a 500 m e alturas que podem variar de 0,1 a 100 m. O termo *draa* é aplicado para formas de leito de maior escala, em que o comprimento de onda varia de 300 a 5.000 m e sua altura varia de 20 a 450m, frequentemente apresentando dunas eólicas sobrepostas (Kocurek, 1981). Os *draas* podem ser classificados como compostos ou complexos. Os *draas* compostos são aqueles em que há sobreposição de dunas de mesma morfologia, já os complexos são aqueles que apresentam sobreposição de dunas de diferentes morfologias (Mountney, 2006b). Scherer (2004) pontua que dunas eólicas são caracterizadas pela presença de estratos cruzados internamente, formados por diferentes processos deposicionais (Figura 6). O processo de fluxo de grãos ocorre na face de deslizamento (*lee slope*, *slipface* ou face frontal) da duna, ocupando a porção superior da face e apresenta-se em forma de cunha, adelgaçando-se em direção ao pé da duna (*dune plinth*). O processo de queda livre de grãos ocorre em toda a face de deslizamento da duna.

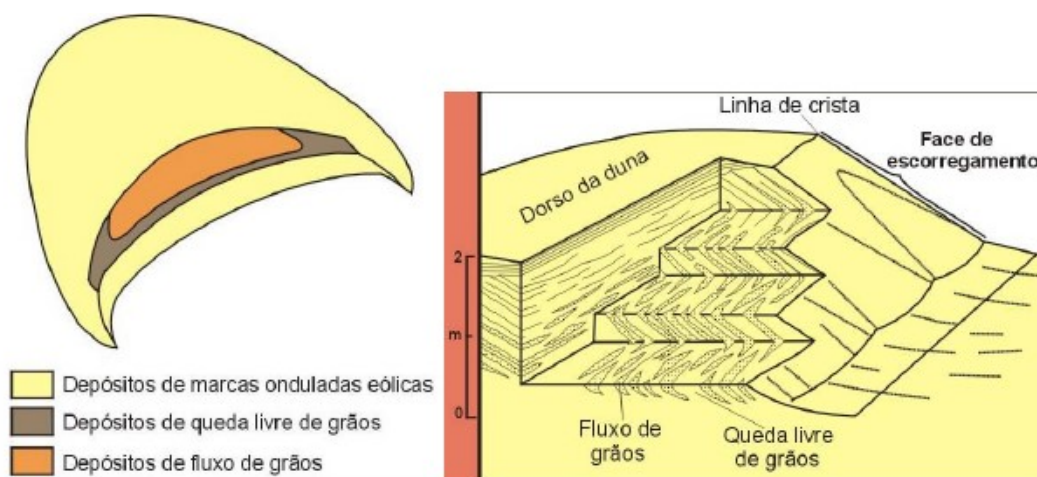


Figura 6. Distribuição dos tipos de depósitos eólicos em uma duna eólica e vista das estruturas internas que compõem uma duna (modificado de Hunter, 1977).

3.1.2.2.1. Tipos de dunas eólicas

Há duas maneiras de definir os tipos de dunas (Figura 7). McKee (1979) utilizou características morfológicas para caracterizar as dunas em crescentes, lineares ou estrelas. Tal classificação baseia-se nas características geométricas dos depósitos como, sinuosidade da linha de crista, número de faces frontais, e ausência de dunas sobrepostas (Scherer, 2004). Dunas crescentes apresentam um perfil assimétrico com uma face frontal, podendo exibir sinuosidade ou não da linha de crista. Dunas lineares apresentam um perfil simétrico com duas faces frontais e dunas estrela apresentam complexo padrão de cristas.

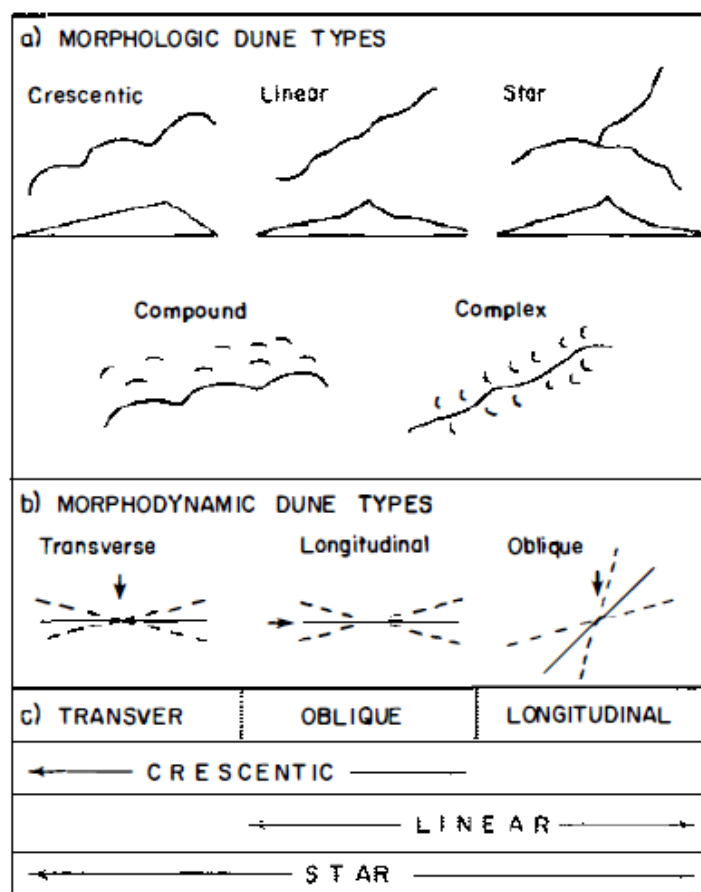


Figura 7. (a) Classificação morfológica de dunas eólicas. Ilustrações superiores: Dunas simples. Ilustração inferior: *draas*; (b) Tipos morfodinâmicos de dunas, as setas indicam o vetor do vento de longa-duração relacionado a orientação das linhas de crista das dunas (linhas tracejadas indicam variações da linha de crista de $\pm 15^\circ$); (c) Variações das orientações de dunas simples, comparando tipos morfodinâmicos e morfológicos (modificado de Kocurek, 1991).

Hunter et al. (1983) utilizaram características morfodinâmicas para caracterizar os tipos de dunas em transversais, longitudinais e oblíquas (Figura 7b). Esta classificação leva em consideração a relação entre a direção da linha de crista das dunas e a direção do vetor médio das direções dos ventos incidentes. Dunas transversas são características de regime eólico pouco complexo e suprimento sedimentar variado, tendo a linha de crista orientada perpendicular à direção do vetor médio dos ventos. Já as dunas longitudinais e oblíquas apresentam regimes de vento mais complexos, com linhas de crista orientadas paralelas e oblíquas (entre 15° e 75°) à direção do vetor médio dos ventos, respectivamente.

Ainda pode-se atribuir nomes de dunas mais específicos (Figura 8), que são usuais, como por exemplo dunas barcanas (classificação morfológica) para dunas

transversas (classificação morfodinâmica) individualizadas em forma de ferradura, com concavidade abrigada do vento; ou dunas parabólicas para dunas transversas em forma de U, parcialmente estabilizadas pela vegetação, com concavidade voltada para o sentido de incidência do vento. Apesar de usual, essa nomenclatura causa confusão pois as classificações morfológicas e morfodinâmicas por vezes se sobrepõem (Figura 7c). A nomenclatura exibida na Figura 8 apresenta, por vezes, uma classificação morfodinâmica baseada em processos (duna oblíqua ou duna longitudinal) e por vezes morfológicas baseadas em descrição (duna estrela). Apesar disso, as diferentes dunas deixam diferentes estruturas arquiteturais no registro, tornando-se importante realizar a distinção de um número maior de classificações de dunas com base em dados morfológicos e/ou morfodinâmicos para poder definir com maior precisão o sistema eólico preservado no registro.

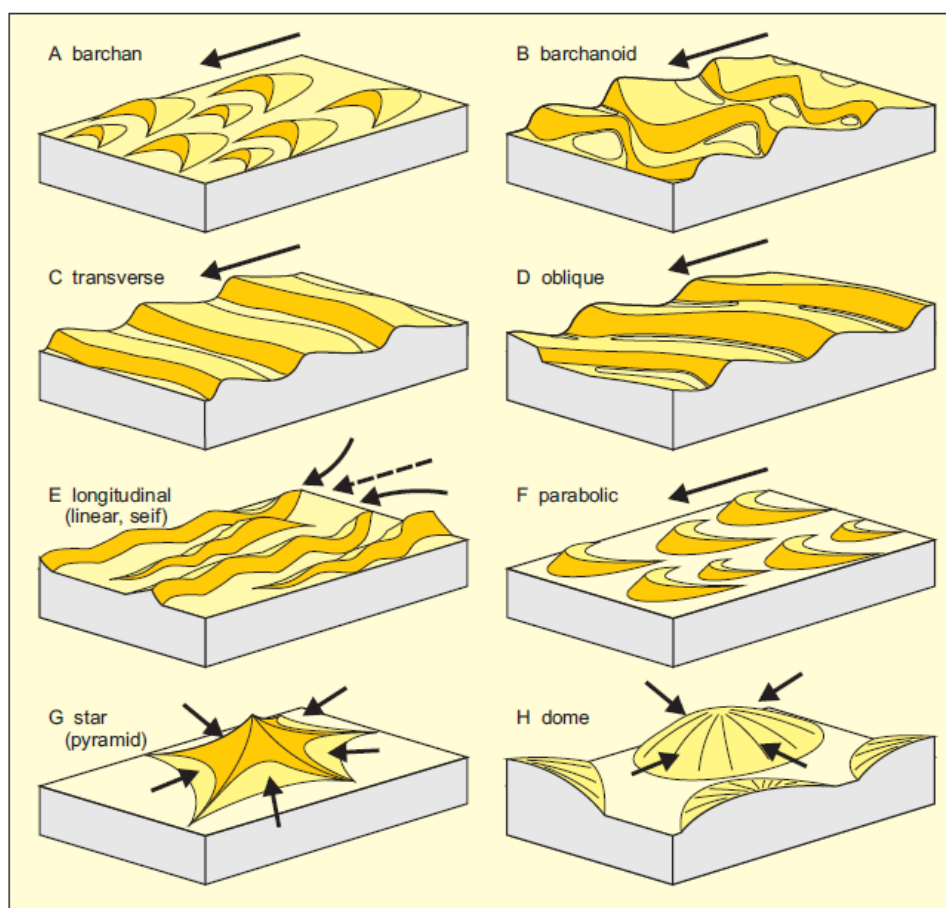


Figura 8. Tipos morfológicos de dunas ilustrado tridimensionalmente. Setas contínuas indicam as direções dos ventos, a seta pontilhada indica a direção de vento resultante. (extraído de Mountney, 2006b).

Os tipos de dunas eólicas são controlados pela relação entre suprimento sedimentar e pela variabilidade da direção do vento (Figura 9). Dunas transversas e barcanas são formadas em regimes de vento com baixa variabilidade e com mais alto ou mais baixo suprimento sedimentar, respectivamente. Dunas estrela e dunas lineares são formadas sob maior variabilidade de regime de ventos. Dunas estrelas formam-se com alto suprimento sedimentar e com alta variabilidade na direção dos ventos incidentes. Dunas lineares (longitudinais) formam-se com duas direções principais de ventos incidentes, formando ângulo de aproximadamente 45° entre si.

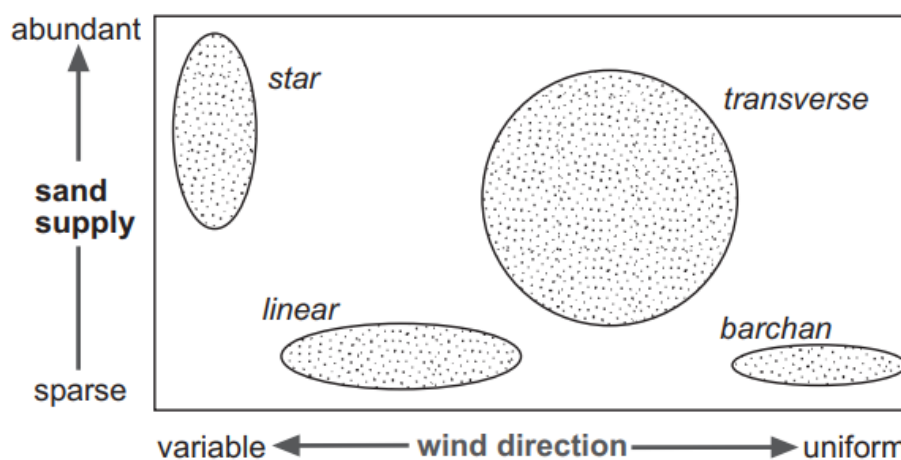


Figura 9. Relação entre suprimento sedimentar e resultante da direção de vento nos tipos de dunas (extraído de Nichols, 2009)

3.1.3 Áreas de Interdunas

As áreas de interdunas são depressões entre dunas eólicas ou *draas*. O tamanho das interdunas é controlado pelo grau de saturação em areia do sistema enquanto a geometria depende da morfologia das dunas. Segundo Ahlbrandt & Fryberger (1981), interdunas podem ser caracterizadas como deflacionárias ou deposicionais, a depender da saturação em sedimentos do sistema. Interdunas deflacionárias são formadas em situações de saturação em sedimentos, onde há cobertura total de areia e esse sedimento é remobilizado para o cavalgamento de dunas eólicas. Já as deposicionais tendem a formar-se em zonas metasaturadas, onde há maior espaçamento entre as formas de leito formando mais expressivas áreas de interdunas entre elas. As interdunas deposicionais

podem ser divididas em três tipos caracterizadas pela posição do lençol freático em relação a superfície deposicional: sistema interduna seco, úmido ou encharcado.

3.1.4 Lençóis de areia

Já os lençóis de areia ocorrem em ambientes desérticos, onde não há condições de contorno para formação de dunas com faces frontais bem desenvolvidas (Fryberger *et al.*, 1979). Kocurek & Nielson (1986) sugerem que os seguintes fatores favorecem o desenvolvimento de lençóis de areia em detrimento de dunas eólicas: (i) limitada disponibilidade de sedimentos devido a posição do lençol freático ou cimentação; (ii) ocorrência periódica de inundação limitando o tempo para formação de formas de leito; (iii) sedimento disponível de tamanho de grão mais grosso; (iv) e/ou presença de vegetação alterando disponibilidade de sedimentos e dinâmica de ventos.

3.1.5 Tipos de Sistemas Eólicos

Três diferentes tipos de sistemas eólicos podem ser diferenciados: secos, úmidos e estabilizados (Kocurek & Havholm, 1993). Sistemas secos e úmidos são diferenciados pela proximidade do lençol freático ou sua franja capilar da superfície deposicional do sistema; já o sistema estabilizado é aquele no qual o substrato permanece estabilizado devido a algum fator superficial, como por exemplo o crescimento de vegetação.

Sistemas eólicos secos caracterizam-se por nível freático e franja capilar abaixo da superfície deposicional, permitindo a disponibilidade de areia constante para transporte pelo vento. Nesses sistemas os processos de erosão e estabilização são dependentes de fatores aerodinâmico e do aporte sedimentar (Kocurek 1996), sendo o processo de acumulação dependente do cavalgamento em ângulo positivo das formas de leito do sistema ou migração para dentro de depressões abrigadas da erosão eólica e acima do nível do freático.

Nos sistemas eólicos úmidos o nível do lençol freático ou de sua franja capilar encontra-se na ou próximo a superfície deposicional (Gianinni *et al.*, 2008). A presença de água diminui a disponibilidade do sedimento para o transporte eólico devido à coesão das partículas. Devido a diminuição da disponibilidade de areia para ser transportada há uma tendência das dunas serem de menor tamanho que nos sistemas eólicos secos. A presença de água no sistema é regida pelo comportamento do lençol freático, taxas de subsidência e variações do nível do mar, porém a resposta do sistema eólico à variação do nível do mar é em função da proximidade entre o sistema e a costa.

3.2 Depósitos Eólicos no Registro Geológico

Os processos eólicos atuantes durante a construção de um depósito podem ser determinados partindo da definição das fácies presentes no sistema. Fácies é definida como um corpo de rocha que apresenta uma combinação de características litológicas, físicas e biológicas, particulares que a diferencie dos corpos de rocha adjacentes (Walker & James, 1992).

Depósitos eólicos são compostos em sua maioria por arenitos esbranquiçados ou avermelhados, com composição predominantemente quartzosa, bem selecionados e bem arredondados, apresentando estruturas características, como grandes conjuntos de estratos cruzados. Além disso, sedimentos eólicos costumam exibir características distintas como o tamanho, forma e grau de selecionamento dos grãos, que podem ser úteis no reconhecimento de estratos eólicos (Pye, 1982; Lancaster, 1986).

Algumas estruturas são típicas de sistemas eólicos. Eriksson & Simpson (1998) demonstram que depósitos de dunas eólicas apresentam estruturas de estratos transladantes cavalgantes, fluxo de grãos, queda de grãos e camadas planares. Uma importante característica que distingue depósitos eólicos de subaquosos são a segregação de grãos nas estratificações eólicas, definindo um padrão bimodal, por vezes com gradação inversa, grau de arredondamento e seleção dos sedimentos, grãos foscos devido à abrasão eólica e pacotes de estratificação cruzada tendem a ser mais espessos.

3.2.1 Elementos arquiteturais

O termo elemento arquitetural foi definido por Pickering et al. (1998) como uma caracterização interpretativa de corpos com características sedimentares diferenciadas através da geometria, escala e fácies sedimentares. Os elementos arquiteturais comumente presentes em depósitos eólicos são: (1) Dunas eólicas; (2) Lençóis de areia eólicos; (3) Interdunas eólicas; (4) *Sabkhas*.

A principal feição de reconhecimento de dunas eólicas são os grandes *sets* de estratos cruzados, compostos por três tipos de estratificações: queda livre de grãos, fluxo de grãos e laminações transladantes cavalgantes. Depósitos de fluxo de grãos apresentam-se em forma de cunhas normalmente com gradação inversa. Depósitos de queda livre de grãos, são caracterizados por lâminas contínuas, espessura milimétrica e granulometria homogênea. Em um *set* de estratos cruzados, estes dois tipos de depósitos encontram-se intercalados. Os depósitos de marcas onduladas eólicas são milimetricamente espaçados, apresentam estratificação transladante cavalgante e gradação inversa compondo a base dos estratos cruzados.

Depósitos de lençóis de areia eólicos formam pacotes tabulares com espessuras de até dezenas de metros e são compostos por laminações plano-paralelas ou de baixo ângulo, sendo raro a presença de estratos cruzados de dunas eólicas. Internamente são normalmente formados pela alternância de laminações transladantes cavalgantes de marcas onduladas eólicas e marcas onduladas de grânulos. Por vezes, ocorrem laminações corrugadas interpretados como estruturas de adesão, indicando um substrato úmido. Os depósitos de lençóis de areia eólicos podem ser intercalados com depósitos subaquáticos que apresentam diferentes litologias e estruturas. Podem haver variações entre depósitos secos e úmidos ao longo de uma sucessão vertical que podem indicar variações nas posições ou taxas de variações do lençol freático.

Os depósitos de interdunas (Figura 10) apresentam características semelhantes aos depósitos de lençóis de areias, porém, tendem a ser menos expressivos e estão sempre intercalados com estratos cruzados de dunas eólicas, podendo apresentar relações de interdigitação entre o pé da duna e a interduna.

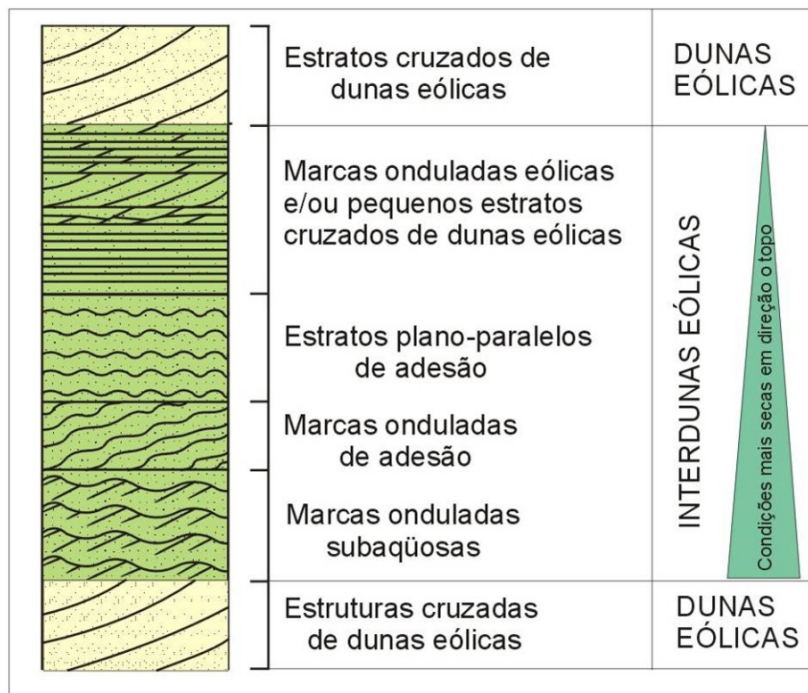


Figura 10. Sequência idealizada de estruturas associadas a depósitos de interdunas eólicas. Exemplo de uma sucessão com progressiva diminuição de umidade em direção ao topo (retirado de Jones, 2012, modificado de Kocurek, 1981).

A identificação do tipo de duna através das estruturas é complexa. Como regra, a identificação da morfologia da duna parte de uma caracterização detalhada da geometria das estratificações, incluindo as medidas das paleocorrentes (Gianinni *et al.*, 2008).

De acordo com Gianinni *et al.* (2008), nas dunas crescentes de crista reta, as faces de deslizamento das dunas apresentam padrão unimodal de paleocorrentes com direção e mergulho pouco variável refletindo uma geometria planar dos estratos cruzados; dunas crescentes de crista curva (barcanas ou barcanóides), a sinuosidade da crista gera uma maior variação no sentido de mergulho das estratificações cruzadas acanaladas gerando estruturas cruzadas acanaladas; em dunas lineares (*seif*) a alternância de duas direções principais de ventos reflete-se diretamente na atitude das faces de deslizamento da duna, as estratificação cruzadas apresentam um padrão entrelaçado com superfícies de truncamento em forma de Z (Bagnold, 1941; McKee & Tibbitts, 1964).

Uma característica que pode ser levada em consideração para divisão de elementos arquiteturais em sistemas eólicos, é a identificação de superfícies limítrofes que possuem um significado genético associada.

3.2.2 Superfícies limítrofes

Brookfield (1977) propôs uma classificação geométrica para superfícies limítrofes presentes em sistemas eólicos. Essas superfícies se formam essencialmente pela migração e cavalgamento de dunas, gerando três superfícies distintas organizadas de forma hierárquica em 1ª, 2ª e 3ª ordem. Kocurek (1996) propôs uma classificação genética em contraponto a classificação geométrica, onde relacionou as superfícies de 1ª, 2ª e 3ª ordem com superfícies de interduna, superimposição e reativação, respectivamente (Figura 11). Kocurek (1988) define um quarto tipo de superfície, denominada de supersuperfície, que representa o fim de um evento de acumulação eólica.

Superfícies de 3ª ordem ocorrem dentro de um *set* de estratificação cruzada, sendo sua gênese atribuída ao efeito de erosão de ventos subordinados seguida por nova deposição eólica devido a flutuações locais nas direções e velocidades do vento, representando por tanto, superfícies de reativação. São truncadas por superfícies de 1ª e de 2ª ordem.

Superfícies de 2ª ordem, denominadas então de superfícies de superimposição, são originadas pela migração de dunas na face frontal de um *draa*. São truncadas na base e no topo por superfícies de 1ª ordem.

Já as superfícies de 1ª ordem marcam a migração de uma duna ou um *draa*, representado pela própria superfície de migração da interduna. São superfícies planas, sub-horizontais que cortam todas as estruturas deposicionais subjacentes.

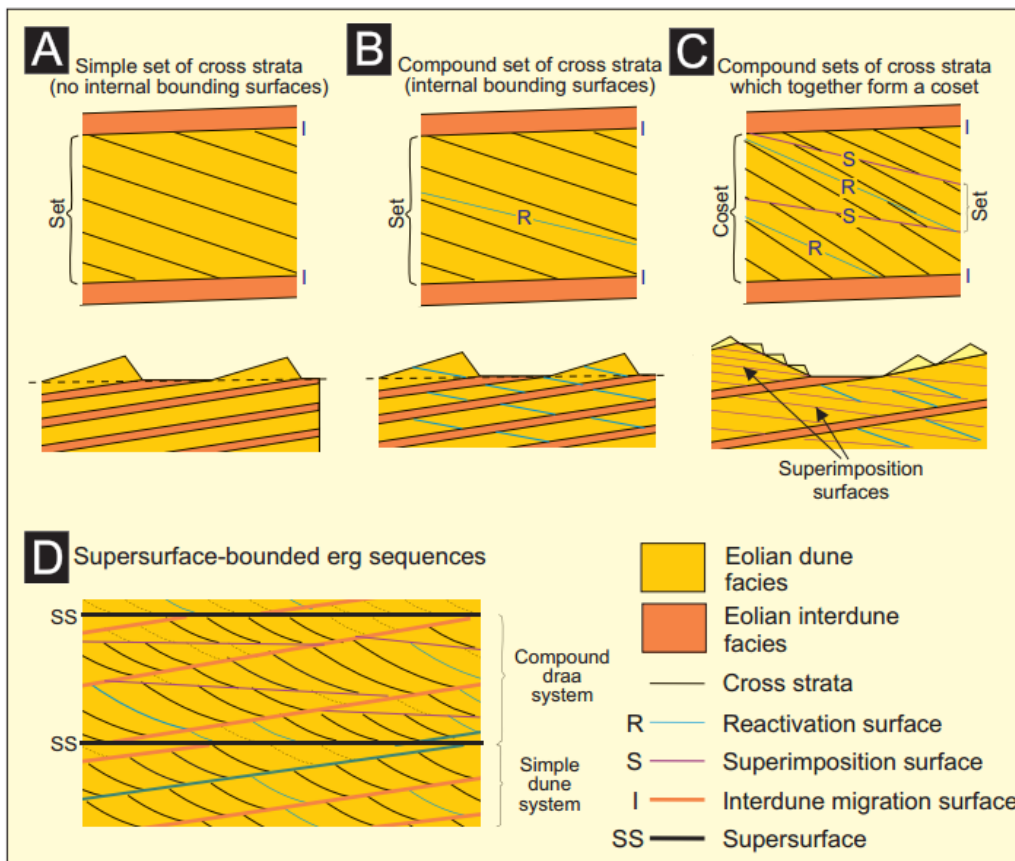


Figura 11. Modelos ilustrando a geometria das superfícies de reativação, superimposição, migração de interduna e supersuperfícies em sistemas eólicos. (extraído de Mountney, 2006b)

A tabela 1 resume as superfícies limítrofes do sistema eólico além de outras três superfícies de grande importância nos sistemas eólicos quando da interação com outros tipos de sistemas deposicionais.

A superfície de inundação que marca a inundação de um campo de dunas eólicas por um sistema aquoso, podendo ser também uma supersuperfície pois marca o fim de um evento de deposição eólica.

A superfície de deflação gerada pela erosão eólica na superfície de um depósito com posterior deposição de sedimentação eólica ou não. Pode ser também uma supersuperfície se demarcar o fim de um evento deposicional.

Por fim a superfície de *sand-drift* gerada pela deflação (erosão eólica) de depósito não-eólico com posterior deposição de sedimentos eólicos.

Tabela 1. Superfícies limites de sistemas eólicos (modificado de Taggart et al., 2010)

Superfície	Origem	Escala	Referencia
Primária	Migração de marcas onduladas eólicas, processos de queda de grãos e de fluxo de grãos na face de frontal de dunas eólicas	Espaçamento vertical de milímetros a decímetros (limites de laminações e <i>set</i> de lâminas)	(Hunter, 1977)
Reativação (3ª ordem)	Erosão da face de sota-vento de duna eólica seguida por sedimentação renovada sob diferentes condições de migração de dunas	Espaçamento vertical de decímetros a dezenas de metros (dentro de <i>set</i> de estratos cruzados)	Rubin (1987)
Superimposição (2ª ordem)	Migração de dunas eólicas sobre uma forma de leito parental de maior escala ou a migração de cavidades (<i>scour troughs</i>) na face frontal de uma duna eólica	Espaçamento vertical de decímetros a dezenas de metros (dentro de <i>co-set</i> de estratos cruzados)	Rubin (1987), Mountney (2006a)
Migração de interduna (1ª ordem)	Migração de formas de leito eólica separadas por interdunas	Espaçamento vertical de decímetros a centenas de metros (limites de <i>set</i> ou <i>co-set</i> de estratos cruzados)	Kocurek (1981)
Supersuperfície	Erosão regional ou <i>by-pass</i> de sedimento em um depósito eólico devido ao final de um evento de acumulação eólica ou contração/migração de um <i>erg</i> .	Extensão regional em área	Kocurek (1988)
Inundação (supersuperfície)	Inundação de um campo de dunas eólicas por um sistema fluvial, lacustre, de maré ou marinho	Extensão local a regional em área	Langford & Chan (1989)
Deflação (supersuperfície)	Deflação da superfície com posterior deposição de sedimentos, eólicos ou não	Extensão local a regional em área	Loope (1985), Kocurek (1988)
<i>Sand-drift</i>	Deflação de depósito não-eólico com posterior deposição eólica	Extensão local a regional em área	Clemmensen & Tirsgaard (1990)

3.2.2.1. Unidades genéticas

A evolução do sistema eólico pode ser interpretada a partir da identificação das variações as quais um sistema é submetido. Essas variações podem ser representadas pela variação na arquitetura de fácies e pela definição das superfícies significativas presentes.

Um intervalo estratigráfico que represente um único evento deposicional eólico pode ser definido como uma unidade genética. Para se definir uma unidade genética é necessário identificar superfícies limítrofes indicativos de início e/ou fim de deposição eólica, como as supersuperfícies (Kocurek, 1988) ou as superfícies de *sand-drift* (Clemmensen & Tirsgaard (1990)).

3.2.3 Interações com sistemas adjacentes

Nas margens dos campos de dunas, as interações com outros tipos de ambientes sedimentares são comuns. Sistemas fluviais localizados nessas regiões podem ser permanentes, intermitentes ou efêmeros, e a interação do sistema fluvial com o sistema eólico está condicionada à morfologia do campo de dunas, orientação entre as linhas de crista e o sistema de drenagem, continuidade de interduna, taxa de migração das dunas e frequência e intensidade das inundações (Langford, 1989; Al-Masrahy and Mountney, 2015).

Feições características da inserção de um sistema fluvial em um sistema eólico são: erosão no pé da duna ou da interduna, deposição de estratos com estruturas subaquosas incompatíveis com uma interduna, deposição de pelitos de planície de inundação. (Clemmensen et al., 1989; Veiga et al., 2002)

Por outro lado, a interação pode ocorrer com um sistema costeiro/marinho. Nesses casos, a intercalação entre estes sistemas indica comportamentos transgressivos e regressivos da linha de costa (Jordan & Mountney, 2012), definindo ciclos retro e

progradacionais, permitindo a definição de tratos de sistemas e superfícies limítrofes (Vieira & Scherer, 2017).

A identificação de interação entre sistemas deposicionais necessita de uma análise minuciosa das características presentes no depósito. Intercalações entre diferentes sistemas deposicionais é muito comum no registro geológico, porém elas podem ocorrer com um largo intervalo de tempo entre a deposição de cada sistema, não tendo interação entre eles durante a deposição. Portanto, para identificar a interação é necessário observar no registro feições que indiquem a atuação de diferentes sistemas deposicionais contemporaneamente, como por exemplo, retrabalhamento de sedimentos eólicos por um sistema fluvial exibindo estruturas subaquosas em sedimentos com texturas características de sistemas eólicos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do projeto foi realizado o levantamento de dados relativos aos afloramentos (Figura 13). Inicialmente, o desenvolvimento baseou-se na revisão bibliográfica com o objetivo de compreender os sistemas eólicos e a aplicação dos métodos que seriam utilizados nas etapas de campo e pós-campo.

Durante a execução do projeto, foi utilizado o fluxograma de análise de fácies proposto por Walker & James (1992) (Figura 12). Primeiramente foram classificadas e interpretadas as fácies que posteriormente foram agrupadas em associação de fácies e definidos os elementos arquiteturais que compõem o sistema. A partir da distribuição lateral e vertical (sucessão de fácies) e das associações de fácies, realizou-se a comparação com exemplos modernos e antigos, possibilitando definir o sistema deposicional preservado no afloramento e as diferentes interações entre sistemas, se essas existirem.

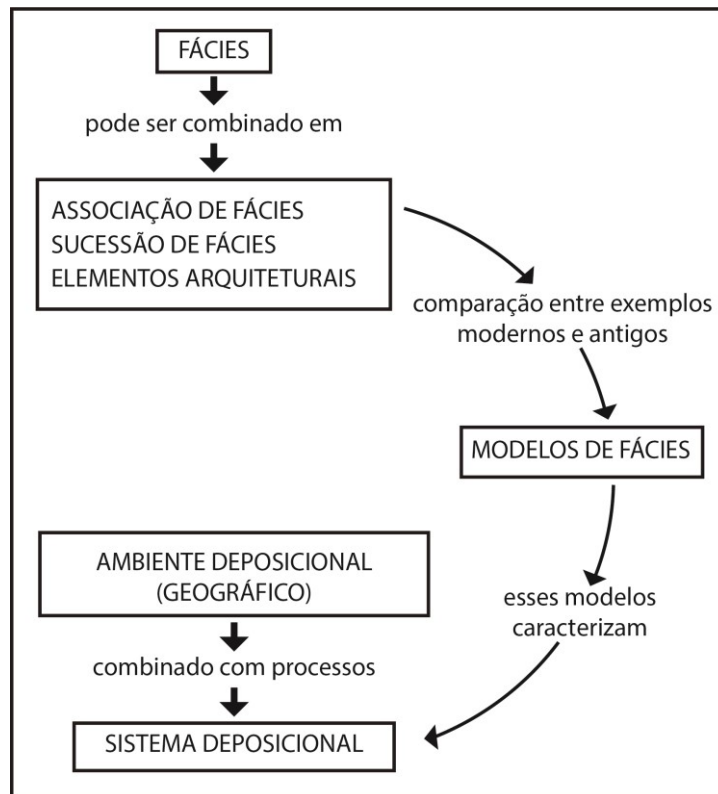


Figura 12. Relações entre fácies, associação de fácies e sistemas deposicionais (adaptado de Walker & James (1992)).

Com base nesse fluxograma, foram aplicados diferentes métodos buscando realizar o levantamento e interpretação dos dados de maneira mais fiel possível ao que está preservado, integrando: a construção de seções colunares, descrição de painéis laterais, imageamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), construção de Modelo Virtual de Afloramento (MVA) e geração de modelo estratigráfico evolutivo, integrando os resultados.

4.1 Revisão Bibliográfica

Durante toda a execução do projeto foi realizada a revisão bibliográfica referente à geologia e estratigrafia presentes na área de estudo, características dos sistemas eólicos, técnicas para interpretar as variações as quais esse sistema foi submetido e atualizações estratigráficas da bacia do Parnaíba. Todos os arquivos foram catalogados no software *Mendeley*®, o qual foi utilizado para gerenciar a bibliografia e, juntamente

com a plataforma *Office*®, auxiliou na escrita e referenciamento bibliográfico ao longo do desenvolvimento do projeto.

4.2 Trabalho de Campo

Os trabalhos de campo, bem como a realização deste projeto, estão inseridos no contexto do desenvolvimento do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “*Arquitetura de fácies e estratigrafia de alta resolução de sistemas eólicos costeiros*” executado em cooperação entre Instituto de Geociências - UFRGS e Petrobras S. A. sob a coordenação do Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer.

Assim, foram realizadas duas incursões a campo, de dois dias cada. Na primeira, realizado em novembro de 2019, foram realizadas as tarefas de levantamento de seções, descrição de painéis laterais, coleta de amostras e imageamento com VANT. Na segunda, realizado em março de 2020, foram realizadas as verificações e correções nos dados e descrição de painéis laterais.

Foi realizado o levantamento de seções colunares em seis pontos (1, 2, 2a, 2b, 3 e 4) e foi realizado a descrição de 5 painéis laterais (1, 2, 2a, 2b e 3) (Figura 13). Os perfis levantados foram nomeados com a sigla ‘TR_000’, onde as letras indicam o projeto e o número indica o perfil de referência. Três dos perfis representam uma porção complementar do afloramento tendo sido utilizado o mesmo numeral adicionado de uma letra para diferenciar (2, 2a e 2b). Os perfis 2 e 2b foram unidos por serem contínuos em sua descrição.

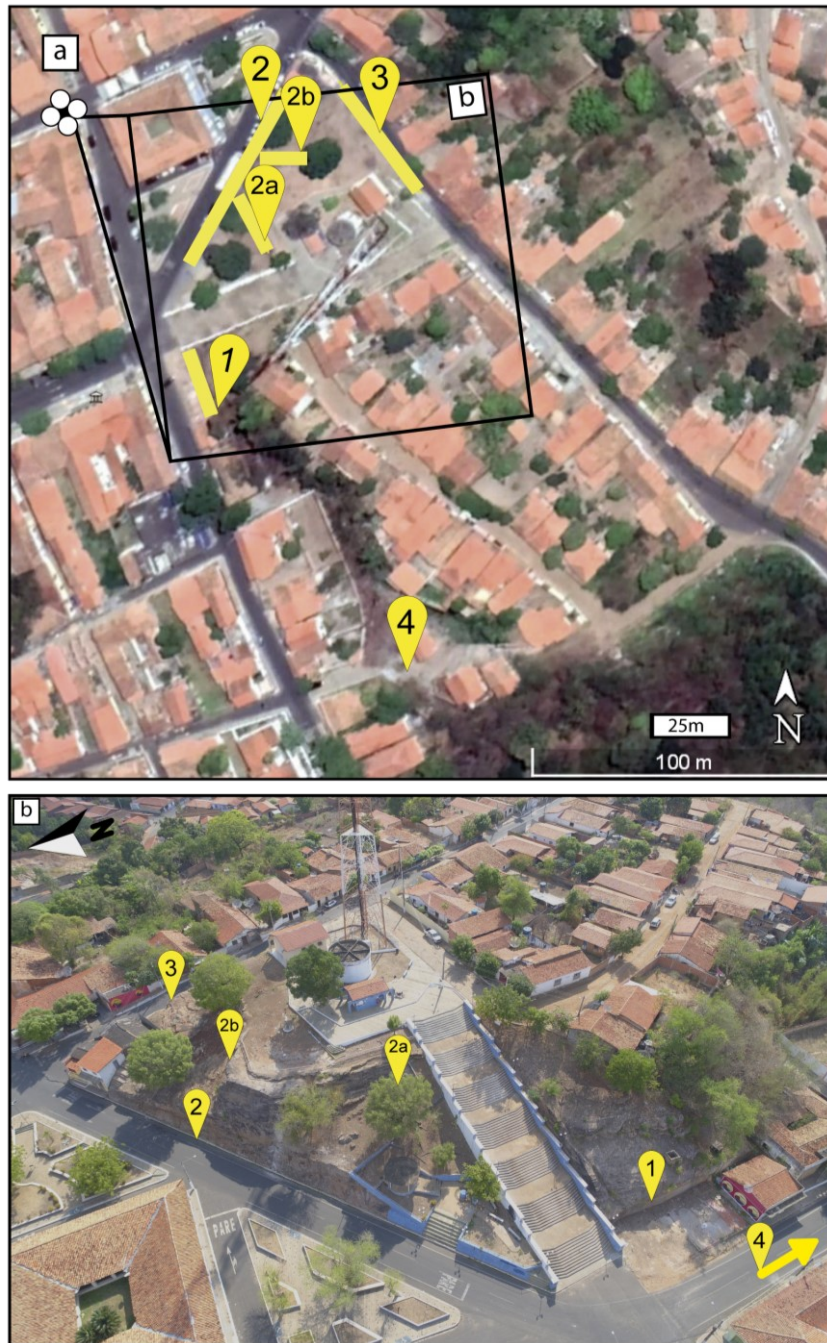


Figura 13. a) Imagem aérea da região dos afloramentos, as barras indicam a posição aproximada dos painéis laterais; b) Fotografia capturada com VANT do afloramento estudado. Os numerais indicam os locais de levantamento de seções e perfis nos quais foram descritos e interpretados painéis laterais. Orientações dos painéis – 001: 160-340; 002: 030-210; 002a: 152-332; 002b: 090-270; e 003: 144-324.

4.2.1 Levantamento de seções colunares

Foram levantados 6 perfis colunares em escala 1:50, visando caracterizar o sistema deposicional através da descrição destas litofácies. Os perfis foram distribuídos de modo que permitissem um arranjo tridimensional da disposição do sistema. Para realizar a medição lineares foi utilizado uma trena métrica; para medir as direções de camadas e definir paleocorrentes foi utilizado uma bússola *Brunton*® modelo *Geo Transit* que permite a leitura de direção e mergulho de camada simultaneamente; além de martelo e lupa para identificar as feições e definir fácies.

Para cada litofácies encontrada no sistema foi atribuído um código de fácies seguindo a lógica proposta por Miall (1996). O código contém duas ou três letras, onde a primeira letra é sempre maiúscula e indica o tamanho de grão dominante da rocha, e as outras letras são postas em letras minúscula e indicam as estruturas presentes. Essa codificação foi realizada em campo, durante a identificação das fácies dominantes no sistema. Os dados de paleocorrente foram apresentados em notação Clar (valor da magnitude do mergulho / valor azimutal do sentido do mergulho).

Os dados de campo foram então digitalizados e interpretados para posterior integração com o Modelo Virtual de Afloramento (MVA), auxiliando na interpretação estratigráfica da arquitetura de fácies preservada no afloramento.

4.2.2 Imageamento com VANT

A fotogrametria pode ser definida como a ciência aplicada a extrair a partir de fotografias as dimensões, formas, feições e posição dos objetos nela contidos (ASP, 1966). O imageamento do terreno com Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) permite a aquisição de dados de topografia (morfologia) e texturas (estruturas sedimentares) da área que, em última instância, auxiliam na identificação da arquitetura estratigráfica presente em um afloramento através da construção, em meio digital, de MVA.

Partindo do imageamento aéreo do terreno e seguindo um conjunto de diretrizes, é possível gerar modelos tridimensionais utilizando algoritmos em meio digital, e assim obter parâmetros físicos do terreno a partir destes. A sobreposição entre imagens durante o levantamento fotográfico deve ser de 60% entre fotos em linhas de voos paralelas e de 80% em imagens sucessivas contidas na mesma linha de voo. A qualidade

e resolução dos modelos gerados irá depender de fatores de obtenção de dados (qualidade da câmera e distância dos objetos), condição do terreno (contrastes) e condições de voo e processamento (sobreposição de fotografias, hardware e software utilizados).

Para o levantamento fotográfico foi utilizado um VANT DJI Phantom 4 PRO, e foram realizadas duas baterias de aquisição dos dados no afloramento. A captura das imagens foi realizada no modo de controle manual do equipamento, buscando cobrir todo o afloramento com fotografias, manter a sobreposição entre fotografias adjacentes, o paralelismo entre o objeto fotografado e a objetiva da câmera, e distância entre VANT e afloramento de 10 a 15 metros. A figura 15 mostra a relação entre as fotografias obtidas e o modelo gerado com o auxílio de software *Agisoft Metashape*®.

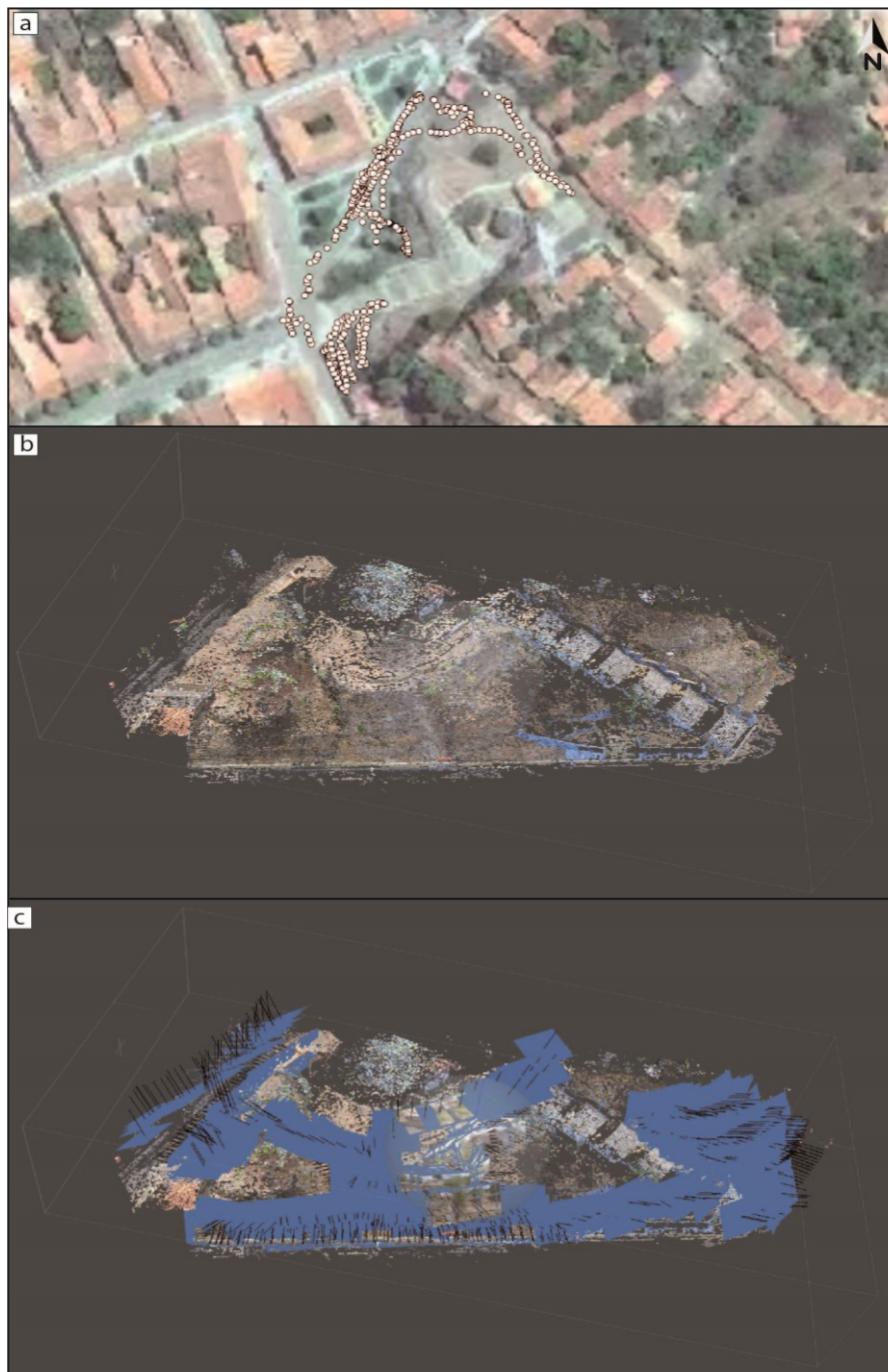


Figura 15. Figura mostrando as posições das fotografias em relação ao afloramento. a) Os pontos brancos representam o ponto de onde a fotografia foi tirada (vista em planta); b) mostra a nuvem de pontos esparsa do afloramento, gerada a partir das fotografias; e em c) a relação entre o afloramento estudado e as fotografias obtidas com VANT.

4.2.1 Painéis Laterais

Ainda em campo, com as imagens adquiridas com o VANT foi gerado um modelo tridimensional utilizando as fotografias através do software *Agisoft Metashape*®. Então, foram criadas ortoimagens com base no modelo e nas fotografias. As ortoimagens foram impressas e sobre elas foi colocado folha de papel translúcido, que permitiu o desenho das interpretações de campo sobre as ortoimagens. Por último, os dados obtidos em campo foram digitalizados para auxiliar na interpretação das relações entre camadas e superfícies presentes no afloramento.

4.3 Laboratório

4.3.1 Modelos Virtuais de Afloramento (MVA)

MVA's podem ser definidos como a projeção georreferenciada no espaço tridimensional de nuvens de pontos, contendo as informações de cor e orientação e/ou superfícies trianguladas e texturizadas, ou simplesmente a representação digital em ambiente tridimensional da superfície topográfica (Tavani *et al.*, 2014). Além disso, é necessário a inserção de informações de caráter geológico para ser considerado um MVA. Esse modelo permite a retirada de informação em ambiente digital das informações contidas no afloramento de interesse como, por exemplo: espessura e relação entre camadas estratigráficas, continuidade de superfícies estratigráficas, atitude de superfícies, entre outros.

Para realizar a construção de um MVA é necessário seguir as seguintes etapas:

- Imagear o afloramento de interesse respeitando os princípios de fotogrametria, capturando fotografias que se sobreponham;
- Levantar dados em campo que auxiliem na interpretação *a posteriori* em meio digital dos modelos, sendo essa etapa optativa na elaboração dos modelos, mas acrescentam um grau de confiabilidade maior ao dado;

- Construir o modelo tridimensional em ambiente digital com auxílio de algum software de interesse através da sobreposição das fotografias capturadas em campo; e
- Interpretar os modelos tridimensionais inserindo informações geológicas no modelo e realizando a leitura de dados que os modelos permitem.

Com a utilização do software Agisoft Metashape[®], foram gerados os modelos tridimensionais através do algoritmo *Structure from Motion* – Multi View Stereo (SfM-MVS) (Carrivick *et al.*, 2016; Viana *et al.*, 2018), seguindo a sequência presente na figura 16.

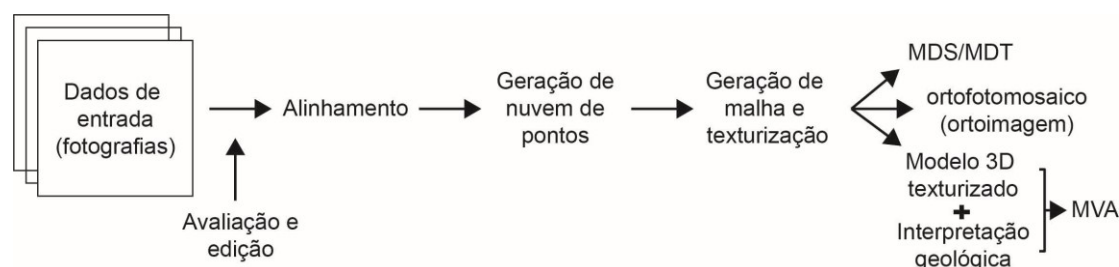


Figura 16. Algoritmo para geração de modelos a partir das fotografias (MDS = modelo digital de superfície, MDT = modelo digital de terreno, e MVA = modelo virtual de afloramento).

Após ter sido realizada a interpretação estratigráfica e a construção do modelo tridimensional, foi então gerado o MVA espacializando as informações disponíveis (Figura 17). Essas informações permitiram a interpretação de porções do afloramento que não puderam ser acessadas, através das identificações de estruturas vistas nas fotografias e expandidas tridimensionalmente, com o controle estratigráfico das seções colunares levantadas.

Foi realizada uma validação simples do modelo, comparando as medidas de paleocorrente obtidas em campo com as medidas feitas dentro do software (Freitas *et al.* 2021). Então foram obtidas medidas de atitude das superfícies.

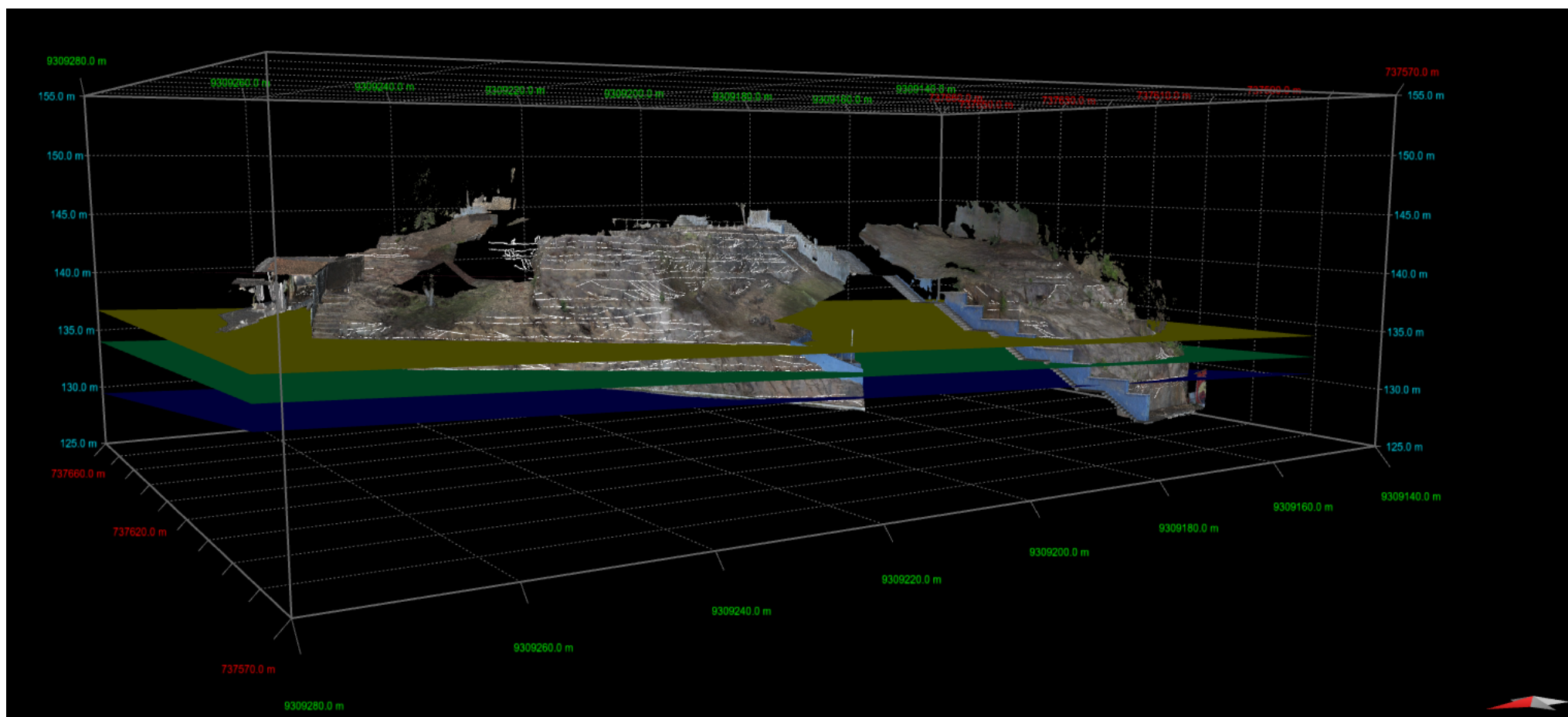


Figura 17. MVA com superfícies geradas dentro do software *Petex Move*® a partir da interpolação de superfícies interpretadas em campo e identificadas no modelo 3D.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 LITOFÁCIES

A partir da descrição sistemática dos afloramentos, foram identificadas 10 fácies preservadas que estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição e interpretação de fácies.

Fácies	Descrição	Interpretação
Sl /Sh/Sr (e)	Arenitos finos a médios, quartzosos, bimodais, bem a moderadamente selecionados, grãos arredondados com laminações de baixo ângulo ou horizontais de marcas onduladas milimetricamente espaçadas (<i>pinstripe</i>) e estratos cruzados de pequeno porte compostos pela migração da forma de leito. As lâminas são milimétricas, inversamente gradadas.	Migração de <i>ripples</i> transladantes cavalgantes. A diferenciação entre estratificação de baixo ângulo ou horizontal é dificultada pelo grande comprimento de onda entre as formas de leito. Por vezes, pode-se preservar a face de sotavento da <i>ripple</i> , gerando estratos cruzados de pequeno porte.
St (e)	Arenitos finos a médios, bimodais, quartzosos, bem a moderadamente selecionados, com grãos arredondados e estratificação cruzada tangencial ou acanalada. Caracterizados por estratos centimétricos de arenitos finos ou médios de fluxo de grãos que afinam em direção a base das camadas intercalados com lâminas transladantes cavalgantes de marcas onduladas eólicas. É possível observar uma variação do ângulo de mergulho dos <i>foresets</i> , diminuindo do topo para a base da camada, além da presença de gradações inversas nas lâminas.	Migração de dunas eólica de crista sinuosa.
Sa	Arenitos muito finos a médios, quartzosos, bem a moderadamente selecionados com laminação corrugada ou marcas de adesão.	Aprisionamento de grãos em saltação ou em suspensão gerados por processos eólicos numa superfície umedecida pela influência da franja capilar.

Sd	Arenitos com estrutura deformada. Arenito finos a médios, bem selecionados, quartzosos, com as estruturas deposicionais deformadas formando feições em chama.	Escape de fluidos.
Sm	Arenitos muito finos a médios, quartzosos, bem selecionados, com grãos arredondados, geralmente fluidizados.	Obliteração da estrutura deposicional anterior devido escape de fluido.
Sl	Arenitos grosso, quartzo-feldspático, moderadamente selecionados, com estratificação cruzada de baixo ângulo.	Migração de formas de leito atenuadas subaquosas, com elevada razão comprimento de onda/amplitude, geradas por correntes trativas sob regime de fluxo transicional.
Sr	Arenito com ripples. Arenitos finos a grossos, quartzosos, moderadamente selecionados, com laminações cruzadas de marcas onduladas (ripples) assimétricas subcríticas a supercríticas.	Migração de marcas onduladas geradas por correntes trativas subaquosas em regime de fluxo inferior.
Ss	Arenito com estratificação sigmoidal. Arenito fino a médio, quartzoso, moderadamente selecionados com estratificação sigmoidal.	Migração de formas de leito de crista sinuosa geradas por correntes trativas em desaceleração. A forma de leito resulta da alta taxa de sedimentação, por correntes trativas sob regime de fluxo inferior.
Sg	Arenito conglomerático, com estratificação cruzada e com intraclastos lamosos de até 0,8 cm, brancos, por vezes alinhados nos <i>foresets</i> dos estratos.	Migração de formas de leito subaquosas em condições de fluxo inferior.

5.2 ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES

A partir da identificação das fácies e das relações verticais e laterais entre elas, foram definidas 4 associações de fácies com significado genético. São elas: (i) dunas eólicas; (ii) interdunas eólicas; (iii) fluvial confinado; e (iv) lençol de areia.

5.2.1 Associação de Fácies de Dunas Eólicas

Associação de fácies de dunas eólicas é caracterizada por arenitos finos a médios, organizados em sets de estratos cruzados acanalados (St (e)) que representam uma alternância entre processos de queda e fluxo de grãos na face de escorregamento da duna, com espessuras entre 0,2 e 1.9 m, que se acunham em direção ao pé da duna, onde dominam depósitos de *ripples* eólicas (Sl (e)). Esta associação de fácies é encontrada em corpos tabulares podendo variar sua espessura lateralmente (Figura 18a), cuja extensão lateral se estende por toda a escala do afloramento. Por vezes, o contato entre os depósitos de dunas e interdunas apresentam-se deformados, descaracterizando as estruturas do topo da interduna e do pé da duna. Os arenitos são de composição quartzosa, bem selecionados, com grãos arredondados, alta esfericidade geralmente caracterizados pela segregação de grãos. Os sets de estratos cruzados apresentam variação no tipo de estratificação, nas porções mais íngremes dos estratos cruzados são caracterizadas por cunhas de arenitos finos a médios, de 0,8 a 4,2 cm de espessura, amalgamados ou separados por lâminas milimétricas de arenitos muito finos (Figura 18c). À medida que as cunhas afunilam em direção à base dos sets, o ângulo de mergulho dos estratos cruzados diminui progressivamente, se interdigitando com arenitos finos com laminação milimetricamente espaçadas e com gradações inversas nas lâminas (Figura 18b). Os sets apresentam variações no tipo de estratificação dominante. Por vezes, dentro de um mesmo set de duna eólica, as superfícies dos estratos cruzados são truncadas no topo por outra superfície de base de um novo depósito de estratos cruzados (Figura 18d). A direção de mergulho dos sets apresenta uma direção média para 300°.

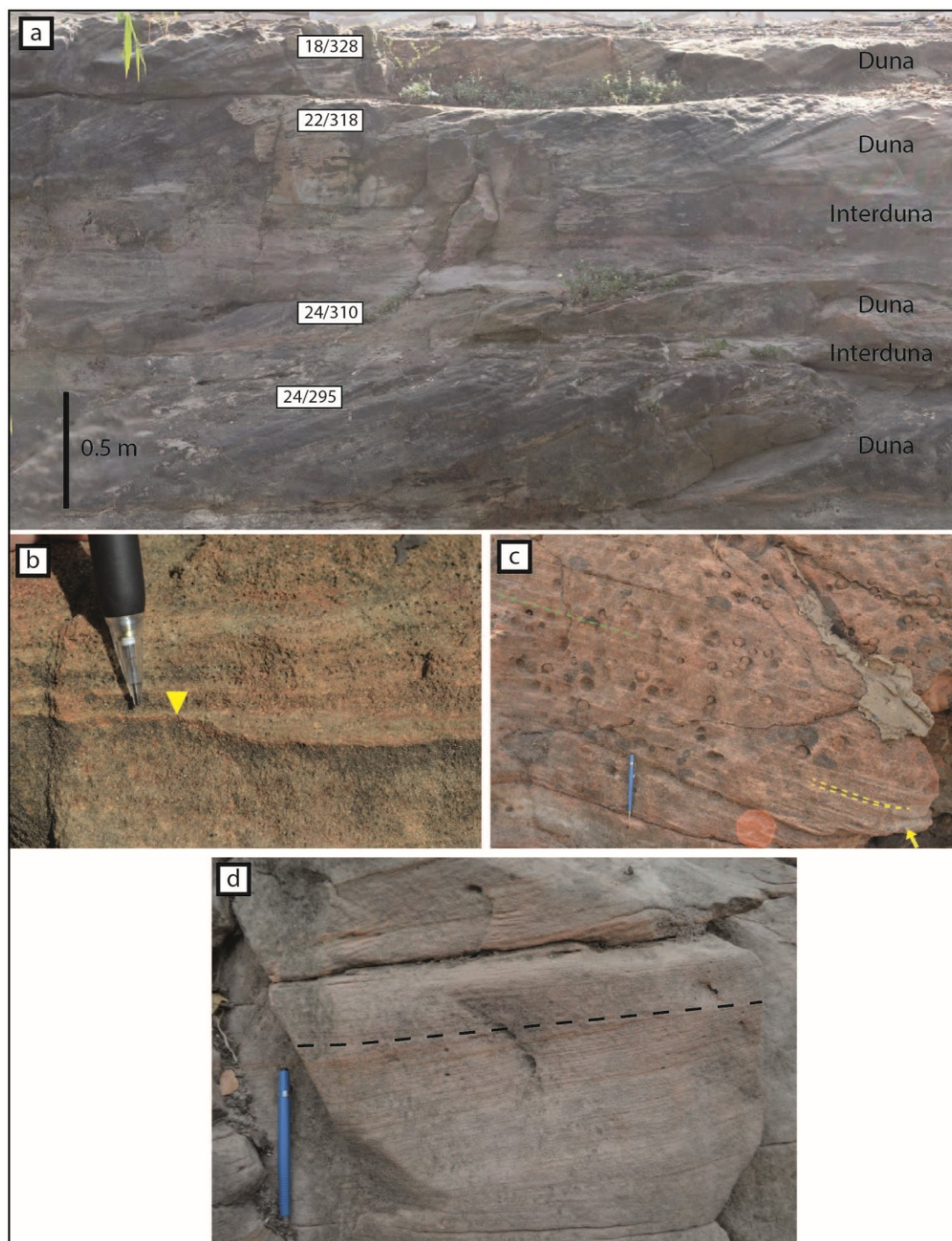


Figura 18. Associação de fácies de dunas eólicas. (a) alternância entre associações de fácies de dunas e interdunas eólica demonstrando a relativa continuidade lateral dos depósitos; (b) gradação inversa; (c) corte transversal a direção de migração da duna demonstrando a intercalação entre depósitos de fluxo e queda de grãos (linha tracejada verde (St (e)), e acunhamento desses depósitos em direção ao pé da duna (linha tracejada amarela). A seta amarela indica depósitos de *ripples* eólicas no pé da duna (SI (e)); (d) a linha tracejada em preto representa uma superfície de reativação (3ª ordem) em um *set* de duna eólica.

A presença de sets de estratos cruzados compostos por arenitos quartzosos finos a médios, com segregação de grãos, compostos por grãos arredondados, de alta esfericidade e boa seleção é característico de depósitos de duna eólicas. Os estratos

centimétricos com geometria em cunha e separados por lâminas milimétricas de grãos mais finos representam depósitos de fluxo de grãos, depositados em cunha devido ao processo gravitacional na face frontal da duna. Os arenitos finos com laminação milimetricamente espaçadas e com gradações inversas nas lâminas que compõem o pé dos estratos cruzados, são interpretados como depósitos de marcas onduladas eólicas (Hunter, 1977). As superfícies contidas em um set de duna eólica truncando estratos cruzados foram interpretadas como superfícies de reativação do depósito eólico, após episódio de erosão da face frontal da duna devido a incidência de vento em direção oposta (Figura 18d). O sentido unidirecional do mergulho dos estratos cruzados tangenciais sugere dunas eólicas crescentes de crista sinuosa (Mckee, 1979).

5.2.2 Associação de Fácies de Interdunas

Esta associação de fácies forma corpos com tendência lenticular de 0,1 a 0,75 metros de espessura, compostos principalmente por arenitos finos e finos a médios, quartzosos, moderadamente a muito bem selecionados, apresentando fácies Sl/Sh/Sr (e), Sa, Sd e Sm. São essencialmente encontrados intercalados com depósitos de base das dunas eólicas. A base das interdunas tende a ser caracterizada por uma superfície plana, podendo apresentar por vezes estruturas côncavas preenchidas, enquanto o topo apresenta irregularidades e/ou deformações, transicionando para os estratos de baixo ângulo de pé da duna. Os arenitos apresentam laminações corrugadas e crenuladas, laminações horizontais ou de baixo ângulo, e por vezes ocorre arenitos maciços ou deformados.

As laminações corrugadas e crenuladas são ocasionadas pela adesão de grãos em transporte eólico em superfície úmida gerada pela influência da franja capilar quando o freático está próximo a superfície de acumulação (Mountney, 2006a). Devido ao fato de a profundidade do lençol variar, quando a superfície deposicional está em condições mais secas, forma-se as laminações horizontais ou de baixo ângulo devido a migração *ripples* transladantes cavalgantes num substrato plano (Figura 19b). Os arenitos maciços ou deformados (Figura 19a), são resultado do escape ascendente de fluídos gerado pela migração da água contida nos poros dos depósitos em resposta a pressão exercida ao acúmulo de sedimento de outra duna em migração, isso gera a obliteração

das estruturas sedimentares possivelmente presentes nos depósitos de interduna, bem como a deformação do pé da duna sobreposta (Doe & Dott, 1980; Mountney, 2006a). As formas côncavas preenchidas por estratos horizontais ou de baixo ângulo presentes no contato entre o topo de uma duna e uma interduna (Figura 19c e d) sugerem feições de erosão de um substrato seco e posterior preenchimento (Mountney, 2006a), indicando a variação do lençol freático da base para o topo do depósito de interduna.

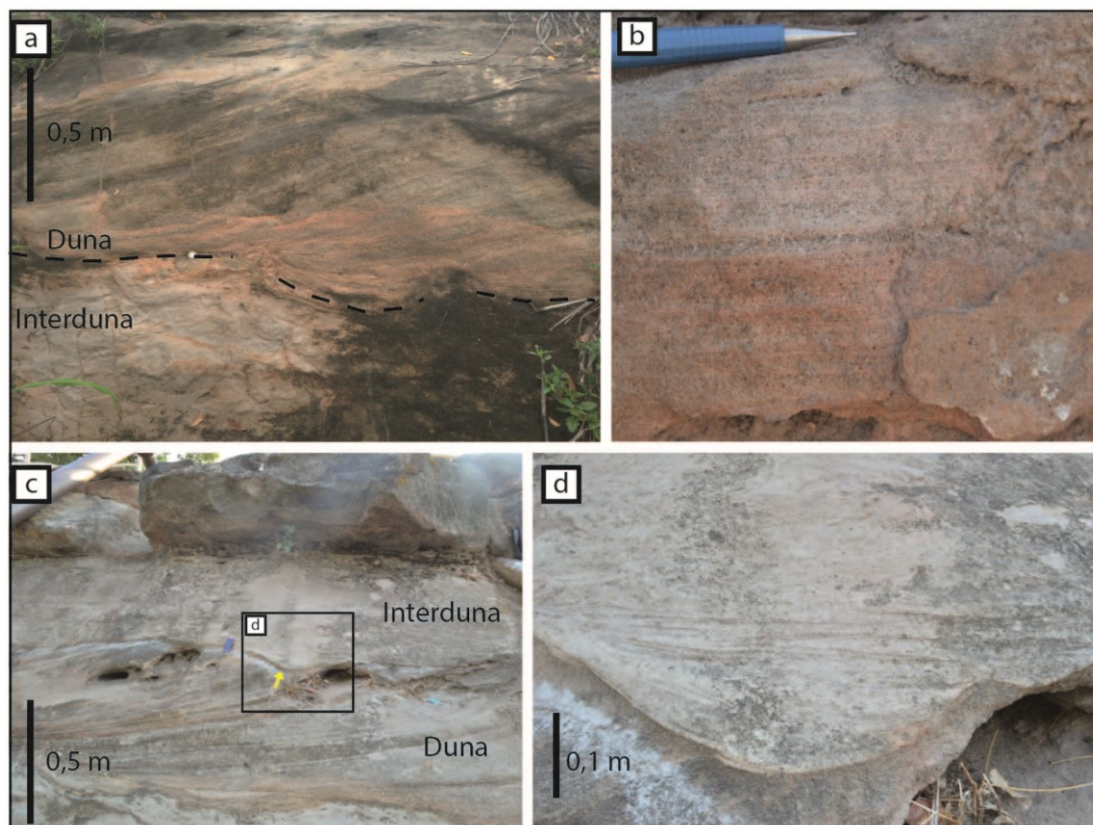


Figura 19. Associação de interdunas. a) contato deformado entre interduna e duna; b) laminação *pinstripe* e de baixo ângulo ou horizontais de migração de estratos transadantes; c) relação entre duna e interduna mostrando a base da duna deformada e o topo da duna com feição de erosão e preenchimento (seta amarela, zoom na figura d).

5.2.3 Associação de Fácies de Lençóis de Areia

A associação de fácies de lençóis de areia é formada por arenitos finos a médios, por vezes com grânulos, compostos pelas fácies Sh/SI/Sr (e), e subordinadamente fácies St (e), Sa e Sd, distribuídos em corpos tabulares, com base abrupta e topo plano, com espessura variando de 1,5 até 2,2 m e extensão lateral que abrange todo o afloramento. Estes arenitos têm composição quartzosa e costumam apresentar-se de moderadamente

a bem selecionados. Estes intervalos são caracterizados principalmente por estratificações transladantes cavalgantes horizontais e de baixo ângulo, e por vezes laminações corrugadas e marcas de adesão. Ocorrem localizadamente *sets* de estratificações cruzadas tangenciais, em lentes de até 0,2 metros. Também, observa-se localmente estruturas em chammas, deformando as estruturas deposicionais.

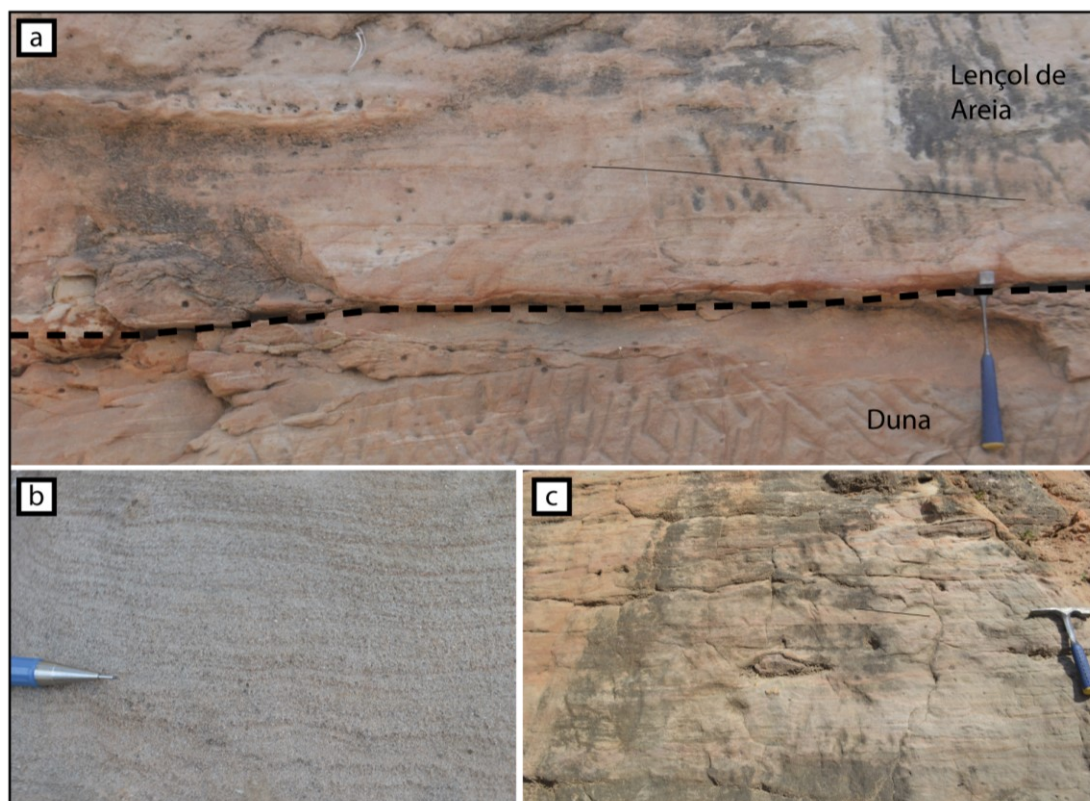


Figura 20. Associação de fácies de lençol de areia. a) contato entre o topo da duna inferior e do lençol de areia. Percebe-se a ocorrência de pequena lente de estratos cruzados próximo a base do lençol de areia. b) laminações finamente espaçadas representando depósitos de migração de *ripples* transladantes cavalgantes; c) no centro da imagem percebe-se feições de deformação das estruturas.

Estes depósitos apresentam diversas características similares aos depósitos de interduna, mas apresentam maiores espessuras maior continuidade lateral bem como topo e base plano, sendo interpretado como depósitos de lençol de areia eólico. A presença de areia grossa indica aumento da capacidade de transporte do vento num contexto de baixa disponibilidade de areia (Kocurek & Lancaster, 1999; Kocurek, 1999). A presença de laminações horizontais e de baixo ângulo representa migração de estratos transladantes e indicam acumulação em lençóis de areia secos, porém as estruturas de adesão, as feições corrugadas e o topo irregular sugerem influência do freático (Fryberger & Schenk, 1981; Fryberger et al., 1992). Os estratos cruzados que aparecem localmente, representam a construção de dunas eólicas isoladas no lençol de

areia eólico. Portanto, interpretou-se que os depósitos de lençóis de areia registraram períodos de flutuação do nível freático, o qual teve uma interferência na redução da disponibilidade de areia.

5.2.4 Associação de Fácies de Depósitos Fluviais

É composto por depósitos de arenito médio a grosso, moderadamente selecionado, com estratificação de baixo ângulo (Sl) (Figura 21 a e 21 b), depósitos de estratos cruzados de pequeno porte (Sr) (Figura 21 c), depósitos de arenito fino a médio moderadamente a bem selecionado com estratificações sigmoidais (Ss), com direção dos estratos para NE (aproximadamente 020°) e arenitos conglomeráticos mal selecionados com estratos cruzados e intraclastos lamosos dispersos nos *foresets* (Sg) (Figura 21e).

Essa associação apresenta ocorrência restrita no intervalo analisado e, continuidade lateral apenas em uma direção. Ocorre em dois intervalos dentro do afloramento, sempre associados à depósitos de interdunas eólicas. No primeiro intervalo, está sobreposto abruptamente a um depósito de interduna, onde a camada basal dessa associação apresenta laminações de baixo ângulo (Sl). As camadas superiores apresentam estratificações de baixo ângulo, ripples e estratificações sigmoidais, sendo truncadas pelos depósitos eólicos sobrepostos. No segundo intervalo, possui apenas 15 cm de espessura, composto pela fácies Sg com direção de mergulho dos *foresets* para 005°. A fácies Sl indica uma rápida variação na descarga fluvial, dificultando a estabilização de formas de leito durante a desaceleração do fluxo (Alexander e Fielding, 1997). As fácies Sr e Ss aparecem sucedidas no intervalo, indicando a estabilização de formas de leitos subcríticas, e um aumento da energia do fluxo e posterior diminuição. Essas variações demonstram a alta variabilidade no regime destes fluxos.

Devido a associação com interdunas, orientação das estruturas aproximadamente perpendicular a migração das dunas eólicas e menor seleção dos depósitos em relação aos depósitos eólicos, por vezes contendo intraclastos lamosos, foram interpretados como depósitos subaquosos associados a eventos esporádicos de descarga fluvial

dentro do sistema eólico, confinados na região interduna. Feições características da inserção de um sistema fluvial em um sistema eólico são: erosão no pé da duna ou da interduna, deposição de estratos com estruturas subaquosas incompatíveis com uma interduna, deposição de pelitos de planície de inundação. (Clemmensen et al., 1989; Veiga et al., 2002), aqui representado por arenito conglomerático intraformacional (Figura 21e).

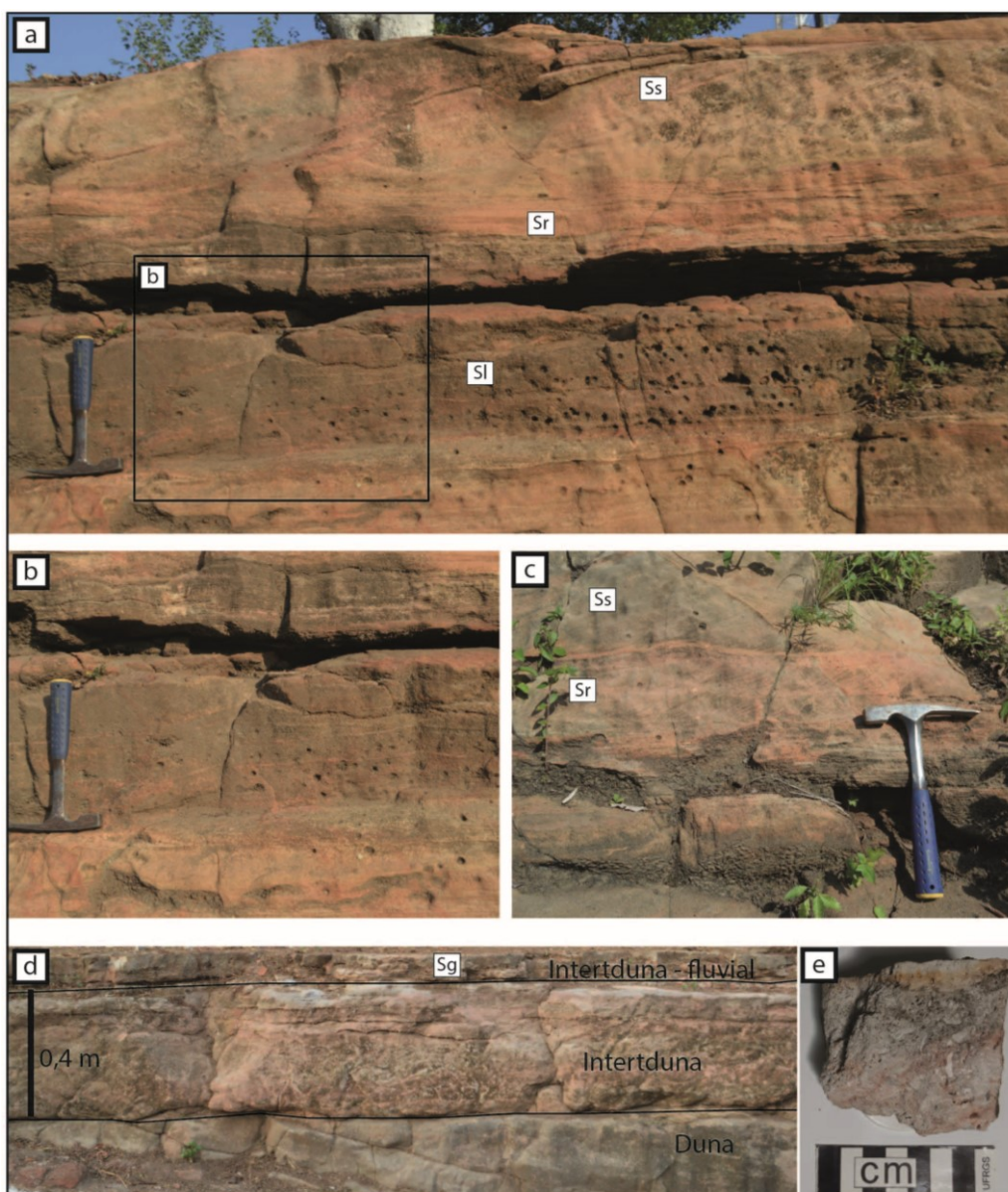


Figura 21. Associação fluvial confinado. a) Fácies Sl, Sr e Ss; b) zoom na fácies Sl; c) Zoom na fácies Sr; d) Fácies Sg e relação com interduna sotoposta; e) fotografia de amostra de mão da fácies Sg.

5.3 PAINÉIS LATERAIS (MVA)

A partir dos modelos tridimensionais interpretados e dos dados de campo, foram gerados os painéis laterais interpretados (Figura 22).

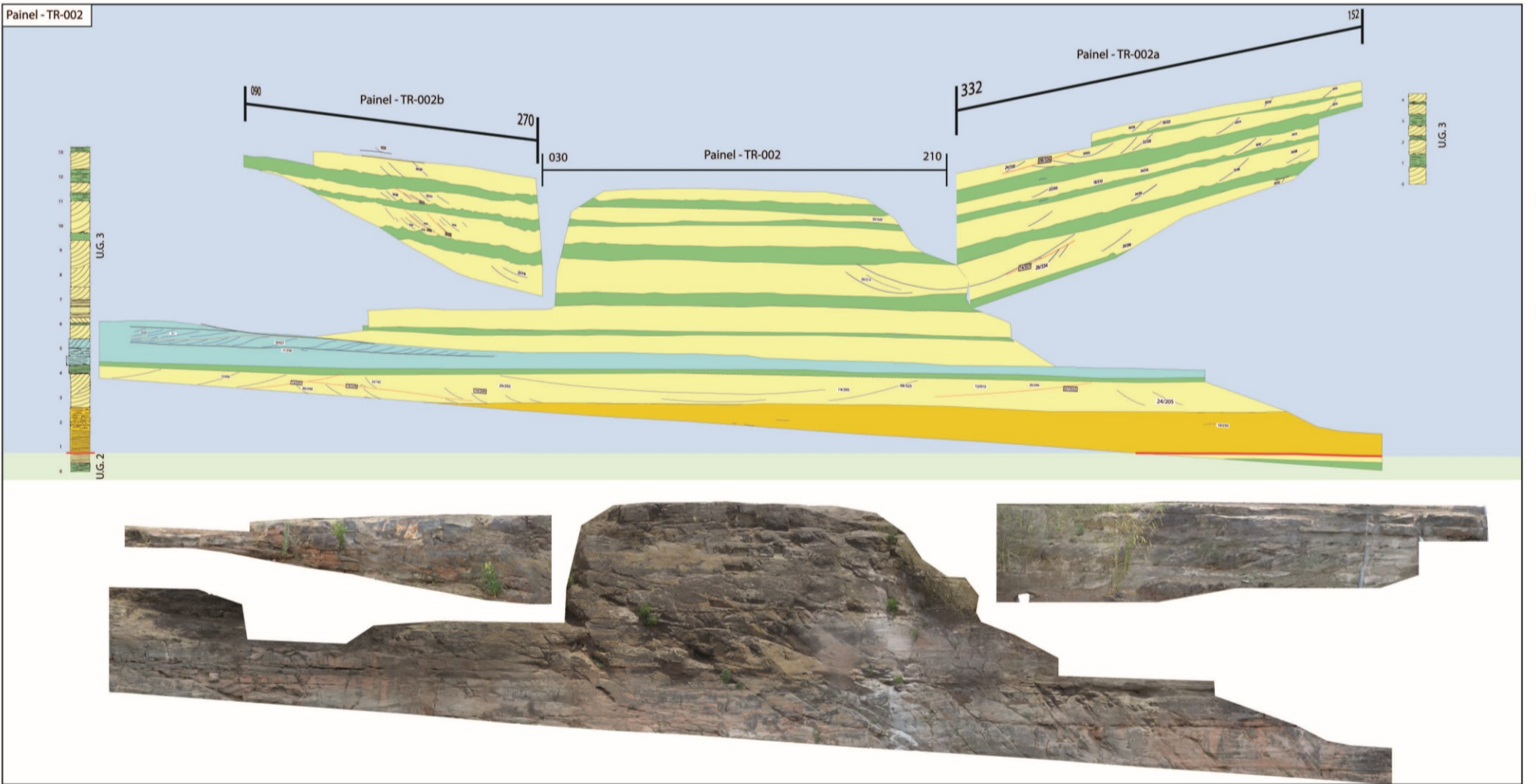
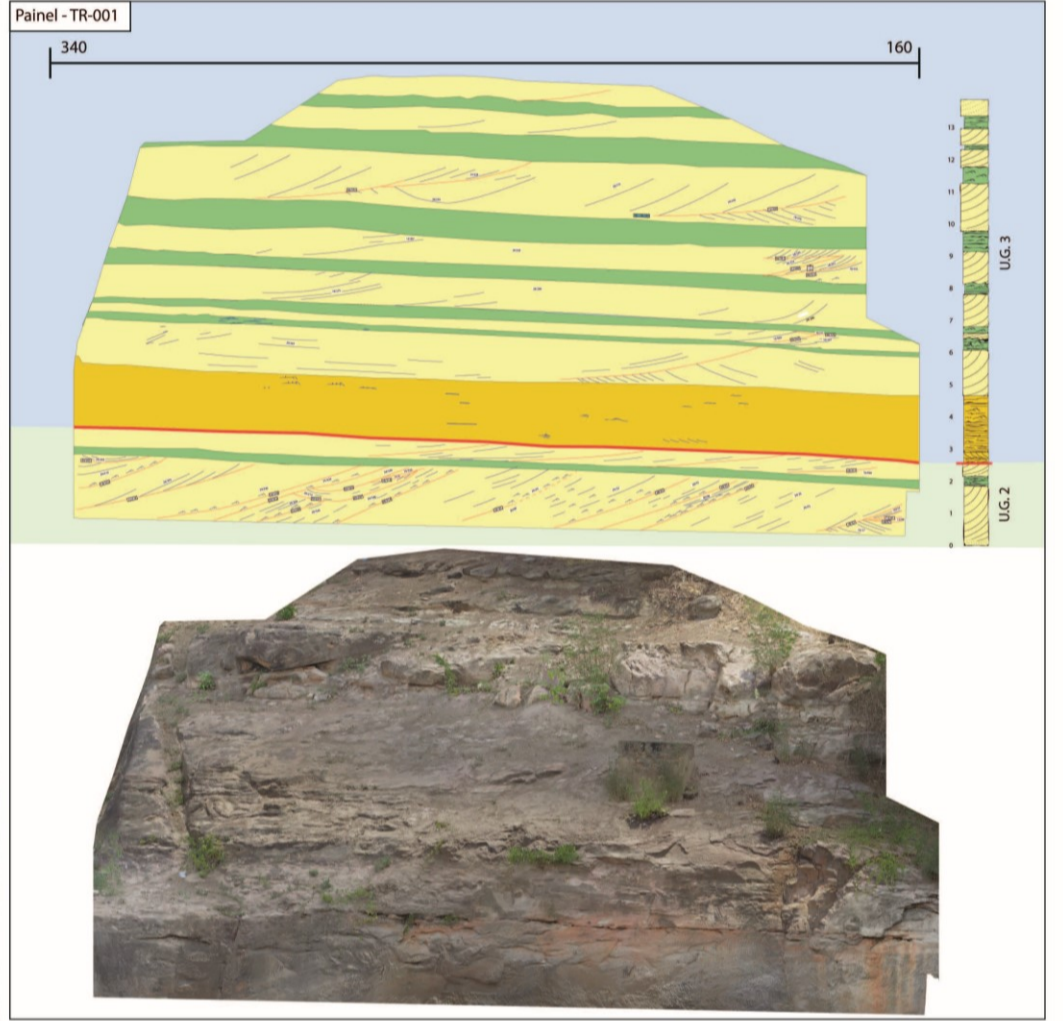
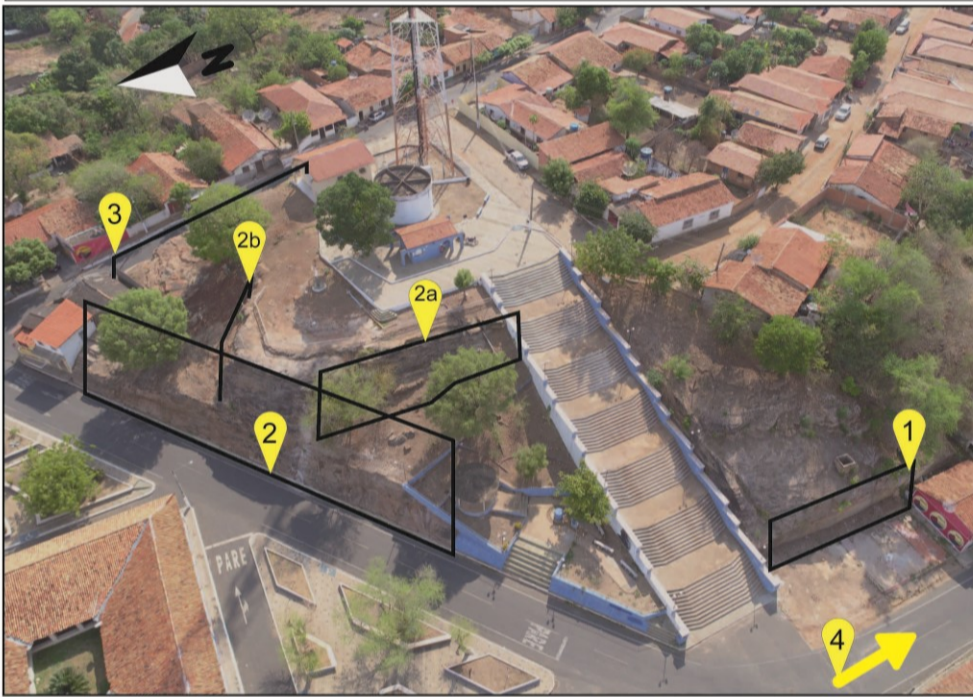
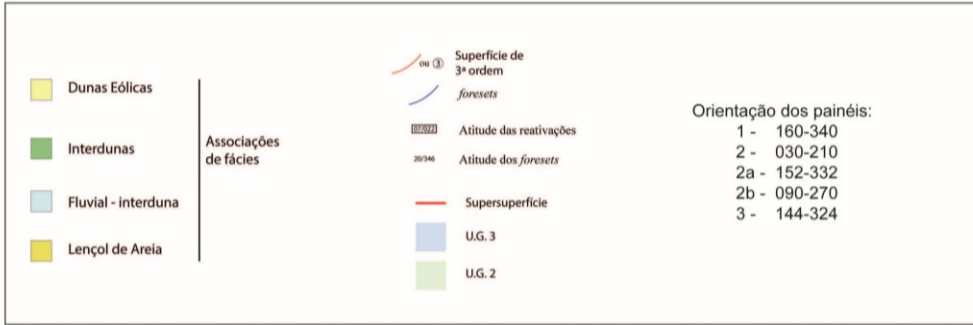
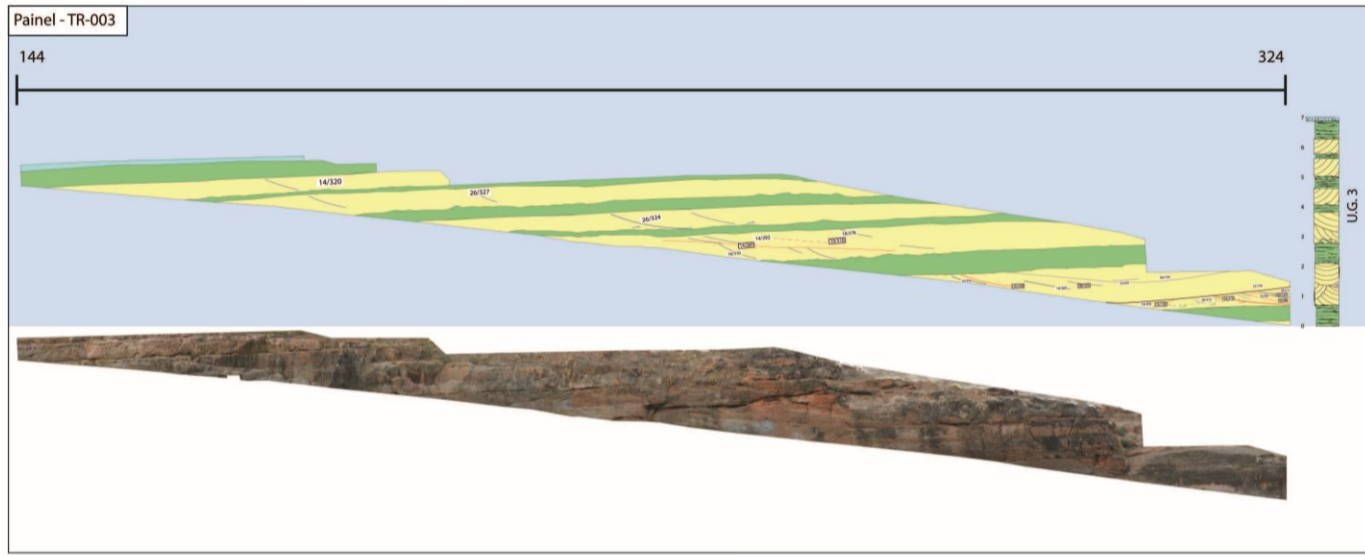


Figura 22. Painéis laterais elaborados e interpretados a partir do Modelo Virtual do Afloramento (ver anexos para maior detalhe).

5.4 UNIDADES GENÉTICAS

Unidades genéticas são pacotes de depósitos eólicos que representam um mesmo evento deposicional e, portanto, são delimitados na base e no topo por superfícies que representem a interrupção desse evento deposicional, marcando um episódio de acumulação. A existência de pacotes de depósito de lençóis de areia, indicam uma mudança nas configurações do sistema, sendo a base deste pacote, uma superfície eólica de deflação (Loope, 1985). Essa supersuperfície (Kocurek, 1988) representa o final da acumulação eólica de uma unidade genética, com posterior deflação dessa unidade e deposição do lençol de areia.

Para o intervalo estratigráfico analisado, foram identificadas três unidades genéticas (Figura 23), numeradas em ordem crescente da base para o topo. Os perfis correlacionados foram aqueles que apresentam a associação de fácies de lençóis de areia, TR_001, 002 e 004. A supersuperfície de base do lençol de areia superior foi utilizada para balizar os perfis, levando em consideração a variação de altitude entre estes. Todas as unidades possuem características estratigráficas semelhantes, sendo que a Unidade Genética 2 (U.G. 2) é a única que se encontra preservada desde a base até o topo; a Unidade Genética 1 (U.G. 1) aflora somente o topo da unidade, enquanto na Unidade Genética 3, o afloramento preserva somente a base.

A U.G.1 está presente somente no perfil TR_004, que está posicionado a SE dos demais perfis. Essa unidade é limitada no topo pela primeira supersuperfície presente no afloramento, base do primeiro lençol de areia. A U.G. 1 apresenta aproximadamente 6 metros de espessura de intercalação de depósitos de dunas e interdunas úmidas. Os *sets* de estratos cruzados de dunas apresentam espessuras de 0,5 a 2 metros, com migração das formas de leito predominantemente para NW, com presença comum de superfícies de reativação. As interdunas variam de 0,35 à 0,45 metros.

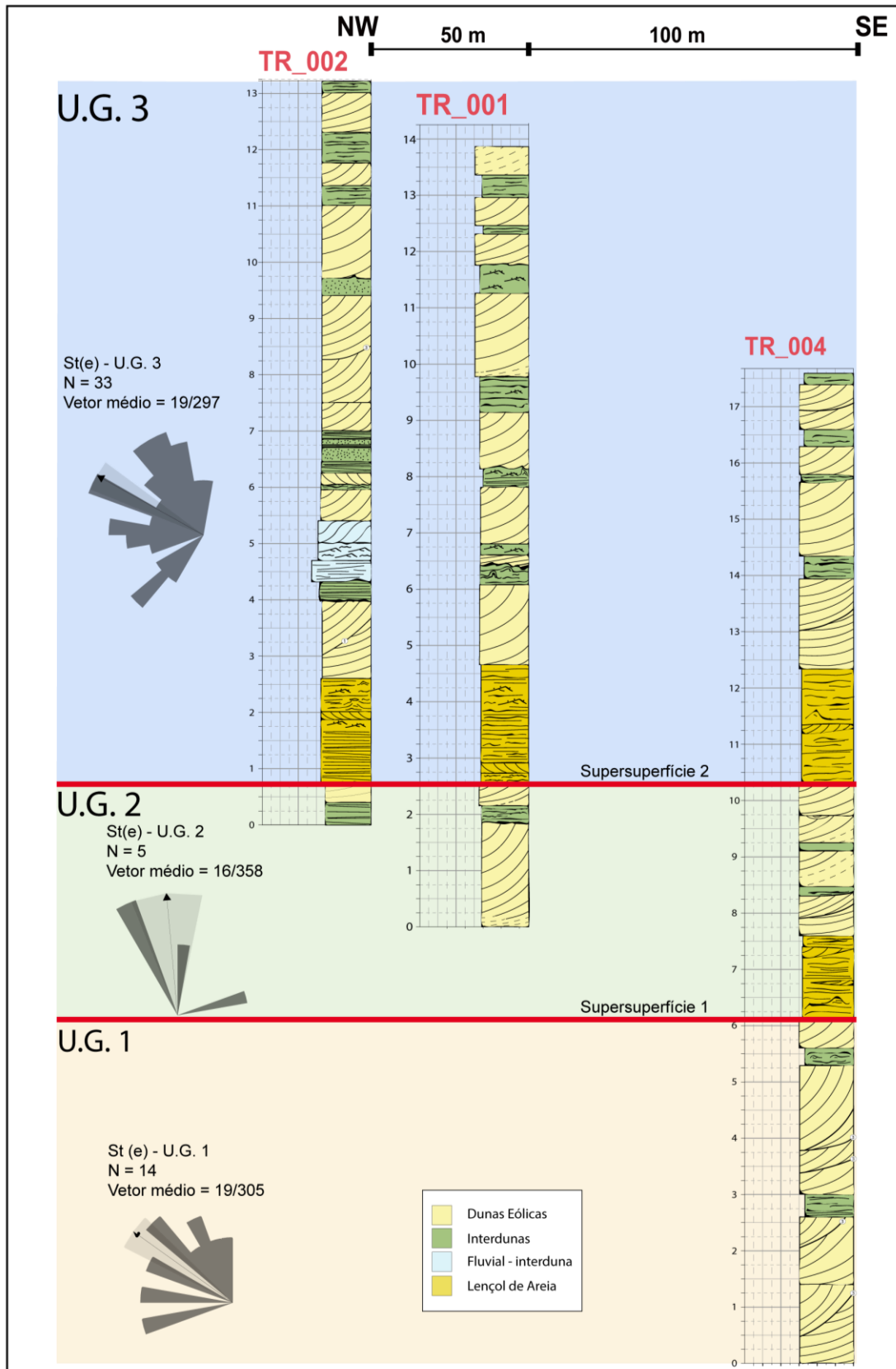


Figura 23. Correlação das seções colunares levantadas, mostrando as supersuperfícies identificadas e a distribuição das três Unidades Genéticas.

A Unidade Genética 2 apresenta aproximadamente 5 metros de espessura e é limitada na base e no topo por supersuperfícies de deflação eólica. A base dessa unidade está representada por um depósito de lençol de areia de 1,5 metros dominado por depósitos de marcas onduladas eólicas de pequeno porte (*ripples* eólicas), com pequenos pacotes lenticulares de estratos cruzados eólicos indicativos de pequenas dunas eólicas, e presença de estruturas deformadas indicativas da presença da unidade próximo a superfície deposicional.

Em direção ao topo, a associação de fácies de lençol de areia eólico é sobreposta por depósitos de dunas eólicas intercaladas com interdunas úmidas. Os *sets* de estratos cruzados de dunas eólicas variam de 0,5 até 0,9 m de espessura, localmente atingindo 1,9 m. A migração das dunas eólicas é predominantemente para NW, com atitudes medidas em campo. O ângulo de cavalgamento variou de 2,5 a 3,2 graus, com ângulos medido no MVA. As interdunas variam de 0,3 à 0,5 metros, dominando as estruturas maciças e deformadas, indicando a constante proximidade do freático. A U.G. 2 apresenta uma sucessão de associações de fácies que indica um aumento de saturação de areia do sistema, partindo de um lençol de areia para depósitos de dunas eólicas associadas a interdunas úmidas. O fim do evento deposicional representado pela U.G. 2 é marcado por outra supersuperfície, base do segundo lençol de areia, que marca o início dos depósitos preservados da U.G. 3.

A U.G. 3 é limitada na base por uma supersuperfície. As características estratigráficas são semelhantes às da U.G.2, com um lençol de areia na base, com espessura de aproximadamente 2 metros, preservando estruturas que indicam variação da posição do lençol freático, de *ripples* eólicas a pequenas lentes de estratos cruzados, a deformações das estruturas e estruturas de adesão. Sobre o lençol entram *sets* de estratos cruzados de dunas eólicas com espessuras variando de 0,25 a 1,5 metros, com direção de mergulho dos *foresets* predominantemente para NW. Intercalam-se pacotes de interdunas com espessuras variando de 0,2 a 0,75 metros, com estruturas de adesão, por vezes com deformação das estruturas e fluidização do topo da interduna e pé da duna. Nessa unidade ocorrem depósitos fluviais associados aos depósitos de interdunas, com direção de mergulho dos *foresets* das estruturas predominantemente para NE, indicando direção de fluxo perpendicular a direção de migração do sistema eólico, e sendo interpretado como incursões efêmeras de sistemas fluviais confinados nas regiões de interduna.

5.5 MODELO E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA

O intervalo estudado preserva a ocorrência de depósitos eólicos com características de sistemas úmidos e pode ser subdividido em 3 unidades genéticas relacionadas a eventos de construção e deflação do sistema eólico (Figura 24). O contato abrupto dos depósitos de lençol de areia eólico sobre associações de dunas e interdunas, indica a deflação da superfície deposicional, possivelmente associado a uma queda no lençol freático, gerando supersuperfícies (Figura 24b). O retorno da acumulação representa uma nova fase de subida do lençol freático, acompanhado inicialmente de uma baixa disponibilidade de areia associada ao desenvolvimento de lençóis de areia eólicos, seguido de um aumento na disponibilidade, permitindo a construção e acumulação de dunas e interdunas eólicas. Entretanto, a ocorrência de interdunas úmidas indica condições metasaturadas, onde o lençol freático esteve sempre posicionado próximo a superfície de interduna, gerando sistemas eólicos úmidos. Estão registrados no intervalo dois eventos de queda e três eventos de subida do lençol freático, resultando em duas supersuperfícies e 3 unidades genéticas. Em nenhum momento, ocorreu a saturação de areia do sistema, que possibilitaria o desenvolvimento de sistemas eólicos secos ou de maior porte.

Durante todo o intervalo de acumulação, o padrão de paleoventos permaneceu com uma direção preferencial para NW, registrado nos depósitos de dunas eólicas com mais expressividade, com raras ocorrências de ventos contrários que geraram erosão da duna com posterior retorno da deposição na direção preferencial e formação de superfícies de reativação, ou na construção de pequenas formas de leito associados aos lençóis de areia.

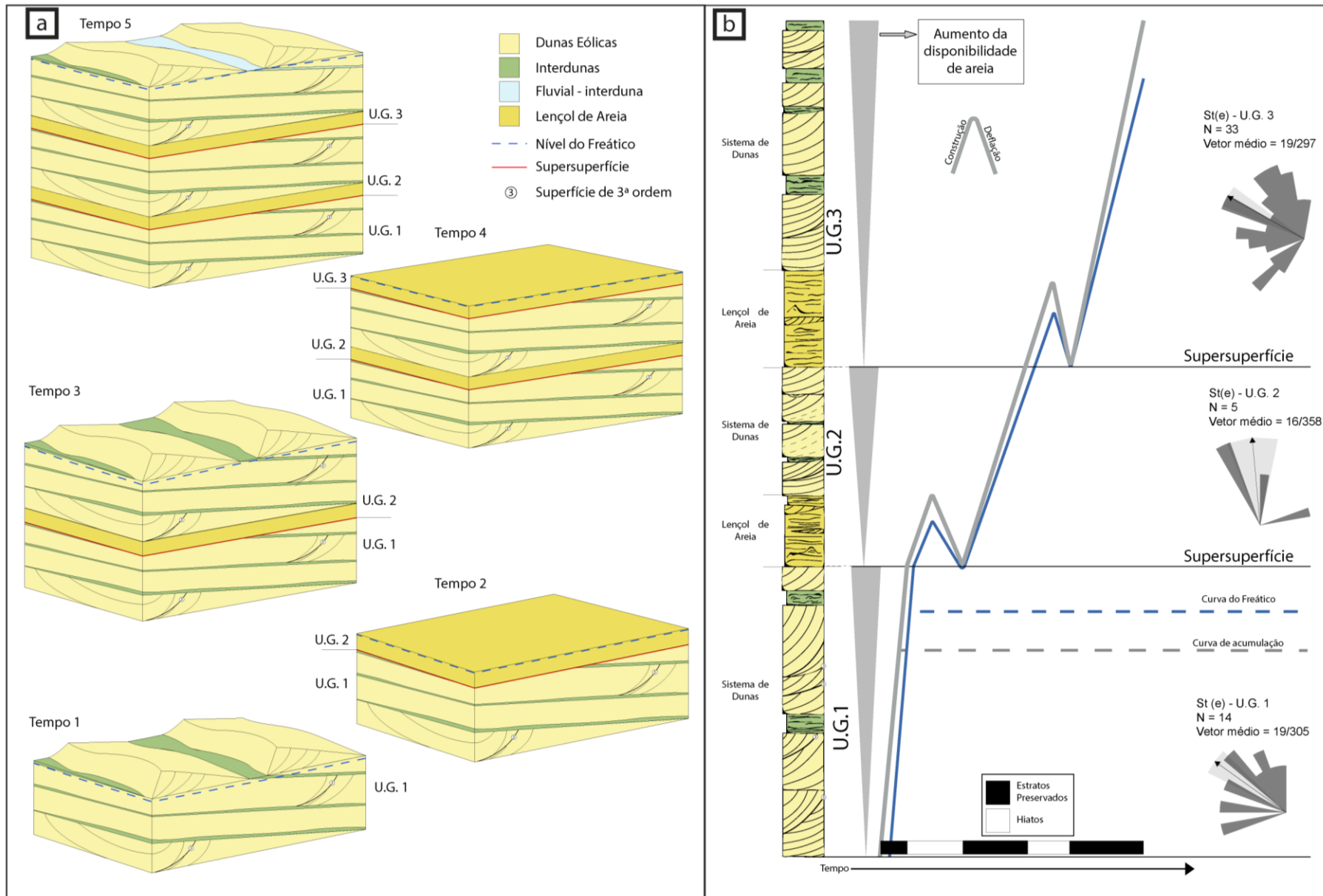


Figura 24. a) Modelo evolutivo para o intervalo estudado; b) curva de deposição/deflação versus nível do freático.

6 CONCLUSÕES

- No intervalo estratigráfico estudado, foram identificadas 9 fácies que foram agrupadas em 4 associação de fácies, sendo elas, dunas eólicas (St(e) e Sl/Sh/Sr(e)), interdunas (Sa, Sd, Sm e Sl/Sh/Sr (e)), fluvial confinado (Ss, Sr, Sl e Sg) e lençol de areia eólico (Sl/Sh/Sr (e), Sd e Sa). A arquitetura de fácies preservadas no afloramento identifica o sistema deposicional como um sistema eólico úmido, com evidências de variações do lençol freático ao longo do tempo.
- As paleocorrentes do sistema eólico apresentam direção de migração das formas de leito para NW, com rara presença de depósitos fluviais com sentido NE, indicando que os depósitos fluviais são raras incursões confinados a região interduna;
- A reconstrução morfológica e morfodinâmica do sistema eólico mostrou que no intervalo estão preservados estratos de dunas eólicas crescentes de crista sinuosa, com baixa variabilidade de incidência dos ventos;
- Foram identificados três eventos de acumulação eólica, separados por duas supersuperfícies que permitem separar o intervalo em três diferentes unidades genéticas (U.G. 1, 2 e 3);

REFERÊNCIAS

- AHLBRANDT, T. S., & FRYBERGER, S. G. (1981). Sedimentary features and significance of interdune deposits.
- ALEXANDER, J., & FIELDING, C. (1997). Gravel antidunes in the tropical Burdekin River, Queensland, Australia. *Sedimentology*, 44(2), 327-337.
- AL-MASRAHY, M. A. & MOUNTNEY, N. P. (2015). A classification scheme for fluvial–aeolian system interaction in desert-margin settings. *Aeolian Research*, 17, 67-88.
- ALMEIDA, F.D. AND CARNEIRO, C.D.R. (2004) Inundações marinhas fanerozóicas no brasil e recursos minerais associados. Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, 43–60.
- ASP. American Society of Photogrammetry. (1966). *Manual of Photogrammetry*, 1220p.
- BAGNOLD, R.A. (1941) *The physics of blown sand and desert dunes*. 302 pp.
- BARBOSA, É.N., CÓRDOBA, V.C. & DO CARMO SOUSA, D. (2016) Evolução estratigráfica da Sequência Neocarbonífera-Eotriássica da Bacia do Parnaíba, Brasil. *Brazilian J. Geol.*, 46, 181–198.
- BROOKFIELD, M. E. (1977). The origin of bounding surfaces in ancient aeolian sandstones. *Sedimentology*, 24(3), 303-332.
- BROOKFIELD, M. E. (1992). Eolian systems. *Facies Models: response to sea level change*, 143-156.
- CAPUTO, M. V. (1984). *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*. UNIVERSITY OF CALIFORNIA
- CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.
- CLEMMENSEN, L. B., & TIRSGAARD, H. (1990). Sand-drift surfaces: A neglected type of bounding surface. *Geology*, 18(11), 1142-1145.
- CLEMMENSEN, L.B.; OLSEN, H.; BLAKEY, R.C. (1989). Erg-margin deposits in the lower Jurassic.
- CUNHA, F.M.B. da (1986) Evolução paleozóica da bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico. *Anuário do Inst. Geociências*, 16, 80–81.
- DOE, T. W., & DOTT, R. H. (1980). Genetic significance of deformed cross bedding; with examples from the Navajo and Weber sandstones of Utah. *Journal of Sedimentary Research*, 50(3), 793-812.
- ERIKSSON, K.A. & SIMPSON, E.L., (1998). Controls on spatial and temporal distribution of Precambrian eolianites. *Sedimentary Geology*, 120, 275-294.

- FREITAS, B. T., SILVA, L. H., ALMEIDA, R. P., GALEAZZI, C. P., FIGUEIREDO, H. G., TAMURA, L. N., ... & ASSINE, M. L. (2021). Cross-strata palaeocurrent analysis using virtual outcrops. *Sedimentology*.
- FRYBERGER, S. G., & SCHENK, C. (1981). Wind sedimentation tunnel experiments on the origins of aeolian strata. *Sedimentology*, 28(6), 805-821.
- FRYBERGER, S. G., HESP, P., & HASTINGS, K. (1992). Aeolian granule ripple deposits, Namibia. *Sedimentology*, 39(2), 319-331.
- FRYBERGER, S.G., AHLBRANDT, T.S. AND ANDREWS, S. (1979) Origin, sedimentary features, and significance of low-angle eolian 'sand sheet' deposits, Great Sand Dunes National Monument and vicinity, Colorado. *J. Sediment. Petrol.*, 49, 733–746.
- GIANNINI, P. C. F., ASSINE, M. L., & SAWAKUCHI, A. O. (2008). Ambientes eólicos. Ambientes de sedimentação siliciclástica do Brasil.
- GOES, A. M. O., SOUZA, J. M., & TEIXEIRA, L. B. (1990). The Parnaíba Basin: exploratory stage and oil perspectives; Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 4.
- HUNTER, R.E. (1977). Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, 24, 361–387.
- HUNTER, R.E.; RICHMOND, B.M. & ALPHA, T. (1983). Storm-Controlled Oblique Dunes Of The Oregon Coast. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 1450-1465.
- JONES, F. H. Caracterização faciológica e estratigráfica dos depósitos eólicos do membro caldeirão da Formação Santa Brígida (Permiano) na bacia de Tucano Norte. 2012.
- JORDAN, O. D., & MOUNTNEY, N. P. (2012). Sequence Stratigraphic Evolution And Cyclicity Of An Ancient Coastal Desert System: The Pennsylvanian–Permian Lower Cutler Beds, Paradox Basin, Utah, USA. *Journal Of Sedimentary Research*, 82(10), 755-780.
- KOCUREK, G. (1981) Significance of interdune deposits and bounding surfaces in aeolian dune sands. *Sedimentology*, 28, 753–780.
- KOCUREK, G. (1988) First-order and super bounding surfaces in eolian sequences - Bounding surfaces revisited. *Sediment. Geol.*, 56, 193–206.
- KOCUREK, G. (1996). Desert aeolian systems. In: Reading, H.G (Editor), *Sedimentary Environments: Processes, Facies And Stratigraphy*. Oxford, Blackwell Science, Pp. 125-153.
- KOCUREK, G. AND DAY, M. (2018) What is preserved in the aeolian rock record? A Jurassic Entrada Sandstone case study at the Utah–Arizona border. *Sedimentology*, 65, 1301–1321.
- KOCUREK, G. AND HAVHOLM, K.G. (1993) Eolian sequence stratigraphy - a conceptual framework. *Siliciclastic Seq. Stratigr. Recent Dev. Appl.* 393–409.

- KOCUREK, G. AND LANCASTER, N. (1999) Aeolian system sediment state: Theory and Mojave Desert Kelso dune field example. *Sedimentology*, 46, 505–515.
- KOCUREK, G. AND NIELSON, J. (1986) Conditions favorable for the formation of warm-climate aeolian sand sheets. *Sedimentology*, 33, 795–816.
- KOCUREK, G., & LANCASTER, N. (1999). Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example. *Sedimentology*, 46(3), 505-515.
- LANCASTER, N., (1986), Grain-size characteristics of linear dunes in the Southwest Kalahari: *Journal of Sedimentary Petrology*, V. 56, P. 395–400
- LANCASTER, N. (1988) Controls of eolian dune size and spacing. *Geology*, 16, 972–975.
- LANGFORD, R.P. AND CHAN, M.A. (1989) Fluvial-aeolian interactions: Part II, ancient systems. *Sedimentology*, 36, 1037–1051.
- LIMA FILHO, F.P. (1991) Fácies e ambientes deposicionais da Formação Piauí (Pensilvaniano), Bacia do Parnaíba.
- LIMA FILHO, F.P. (1998) A sequência Permo-Pensilvaniana da Bacia do Parnaíba. 155.
- LIMA, E. DE A.M. AND LEITE, J.F. (1978) Projeto estudo global dos recursos minerais da bacia sedimentar do Parnaíba. 413.
- LOOPE, D.B. (1985). Episodic deposition and preservation of eolian sands: a late Paleozoic example
- MCKEE, E. D., & TIBBITTS, J. (1964). Primary structures of a seif dune and associated deposits in Libya. *Journal of Sedimentary Research*, 34(1), 5-17.
- MCKEE, E.D. (1979). sedimentary structures in dunes. In: Mckee, E. D. (Ed). *Global Sand Sea*. US Geol. Surv. Prof. Pap., 1052, 429p.
- MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. P., (1964). Maranhão Paleozoic basin and Cretaceous coastal basins, north Brazil. *AAPG Bulletin*, v. 48, n. 9, p. 1475-1512,
- MIALL, A.D., (1996). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. New York, Springer-Verlag, 582 P.
- MILANI, E. J. & A. THOMAZ-FILHO. (2000). Sedimentary Basins Of South America. Pp. 389–449. In: Cordani, U. G., E. J. Milani, A. Thomaz-Filho & D. A. Campos (Eds). *Tectonic evolution of South America*. 31st International Geological Congress. Rio De Janeiro, Academia Brasileira De Ciências E Departamento Nacional Da Produção Mineral (DNPM), 856p.
- MOUNTNEY, N.P. (2006a) Periodic accumulation and destruction of aeolian erg sequences in the Permian Cedar Mesa sandstone, White Canyon, Southern Utah, USA. *Sedimentology*, 53(4), 789–823.
- MOUNTNEY, N.P. (2006b) Eolian facies models. In: *Facies models revisited*, SEPM (Society for Sedimentary Geology), 19–83.

- NICHOLS, G. (2009) *Sedimentology and Stratigraphy*, 2nd ed. 432 pp.
- OLIVEIRA, D.C. DE AND MOHRIAK, W.U. (2003) Jaibaras trough: An important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. *Mar. Pet. Geol.*, 20, 351–383.
- PICKERING, K.T., HISCOTT, R., AND HEIN, F.J., (1989). *Deep-marine Environments: Clastic Sedimentation and Tectonics*: London (Unwin Hyman).
- PORTER, M.L. (1986) Sedimentary record of erg migration. *Geology*, 14, 497–500.
- PYE, K. (1982). Morphological development of coastal dunes in a humid tropical environment, Cape Bedford and Cape Flattery, North Queensland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 64(3-4), 213-227.
- RUBIN, D.M. (1987). Formation of scalloped cross-bedding without unsteady flow. *J. Sed. Petrol.*, 57, 39-45.
- SCHERER, C.M.S. (2004) *Sedimentologia e estratigrafia de sistemas fluviais e eólicos*. 1, 78 P.
- SMALL, H. (1914) *Geologia e suprimento d'água subterrânea no Piauí e parte do Ceará: Brasil*. Rio Janeiro, Insp. Fed. Obras Contra As Secas., Série 1-D, 146 p.
- TAGGART, S., HAMPSON, G.J. AND JACKSON, M.D. (2010) High-resolution stratigraphic architecture and lithological heterogeneity within marginal aeolian reservoir analogues. *Sedimentology*, 57, 1246–1279.
- TAVANI, S., GRANADO, P., CORRADETTI, A., GIRUNDO, M., IANNACE, A., ARBUÉS, P., MUÑOZ, J.A. AND MAZZOLI, S. (2014) Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Comput. Geosci.*, 63, 44–53.
- VAZ, P.T., REZENDE, N.G.A.M., WANDERLEY FILHO, J.R. & TRAVASSOS, W.A. (2007) Bacia do Parnaíba. *Bol. Geociencias da Petrobras*, 15, 253–263.
- VEIGA, G.D.; SPALLETI, L.A.; FLINT, S. (2002). *Aeolian/ Fluvial Interactions And High-Resolution Sequence*.
- VIANA, C. D. GROHMANN, C. H. BUSARELLO, M. S. T. GARCIA, G. P. B. (2018). Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná basin, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 48: 839-852.
- VIEIRA, L.V. AND SCHERER, C.M. DOS S. (2017) Facies architecture and high resolution sequence stratigraphy of an aeolian, fluvial and shallow marine system in the Pennsylvanian Piauí Formation, Parnaíba Basin, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.*, 76, 238–256.
- WALKER, R.G. AND JAMES, N.P. (1992) *Facies Models: response to sea level changes*. *Geol. Assoc. Canada*, 407.

WILSON, I.G. (1972) Aeolian bedforms — Their development and origins.
Sedimentology, 19, 173–210.

ANEXOS

Anexo 1: Perfis colunares digitalizados.

Anexo 2: Painéis laterais elaborados e interpretados a partir do Modelo Virtual do Afloramento.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

SEÇÃO/UNIDADE: Escadaria / Amarante

NOMES: Rossano e Carrel

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

Ponto: **TR_001**

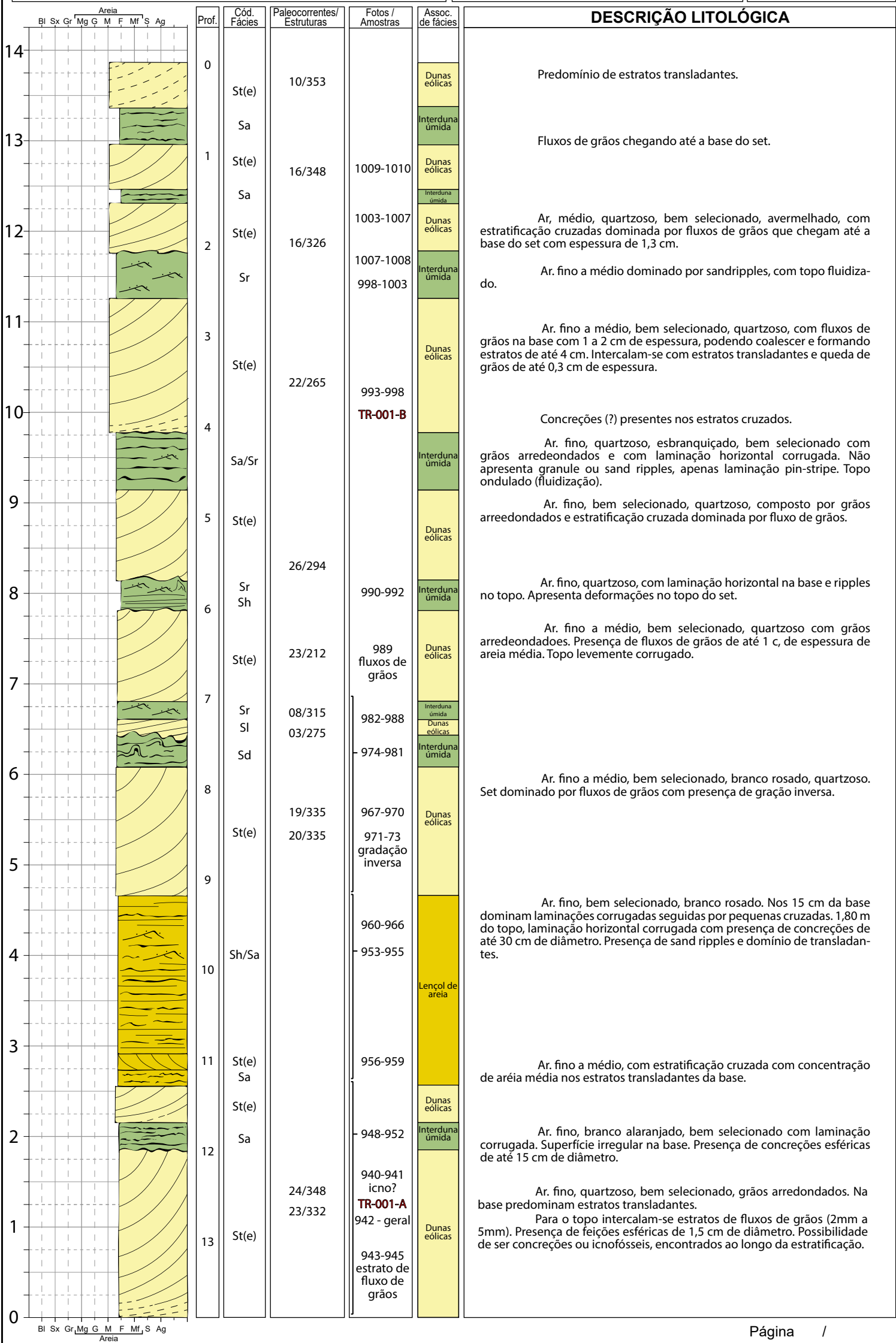
Coord. **111m**

E: - 42.852696

N: - 6.245567

Data: 11/11/2019

Escala: 1:50



COLUNA ESTRATIGRÁFICA

SEÇÃO/UNIDADE: Escadaria / Amarante

NOMES: Rossano e Carrel

ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS HIDRODINÂMICOS OU DEFORMACIONAIS

- M Maciço
- Lam. Plano Paralela
- Lam. Cruz. de ripples
- Ripples assimétricas
- Ripples simétricas
- E. Cruz. Baixo Ângulo
- E. Cruzada Planar
- E. Cruz. Tangencial
- E. Cruz. Acanalada
- Lam. Ondulada Truncada
- Estrutura de Carga
- Estrutura em Chama
- Fluidização
- Lam. Convoluta
- Escorregamento

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

Ponto: **TR_002**

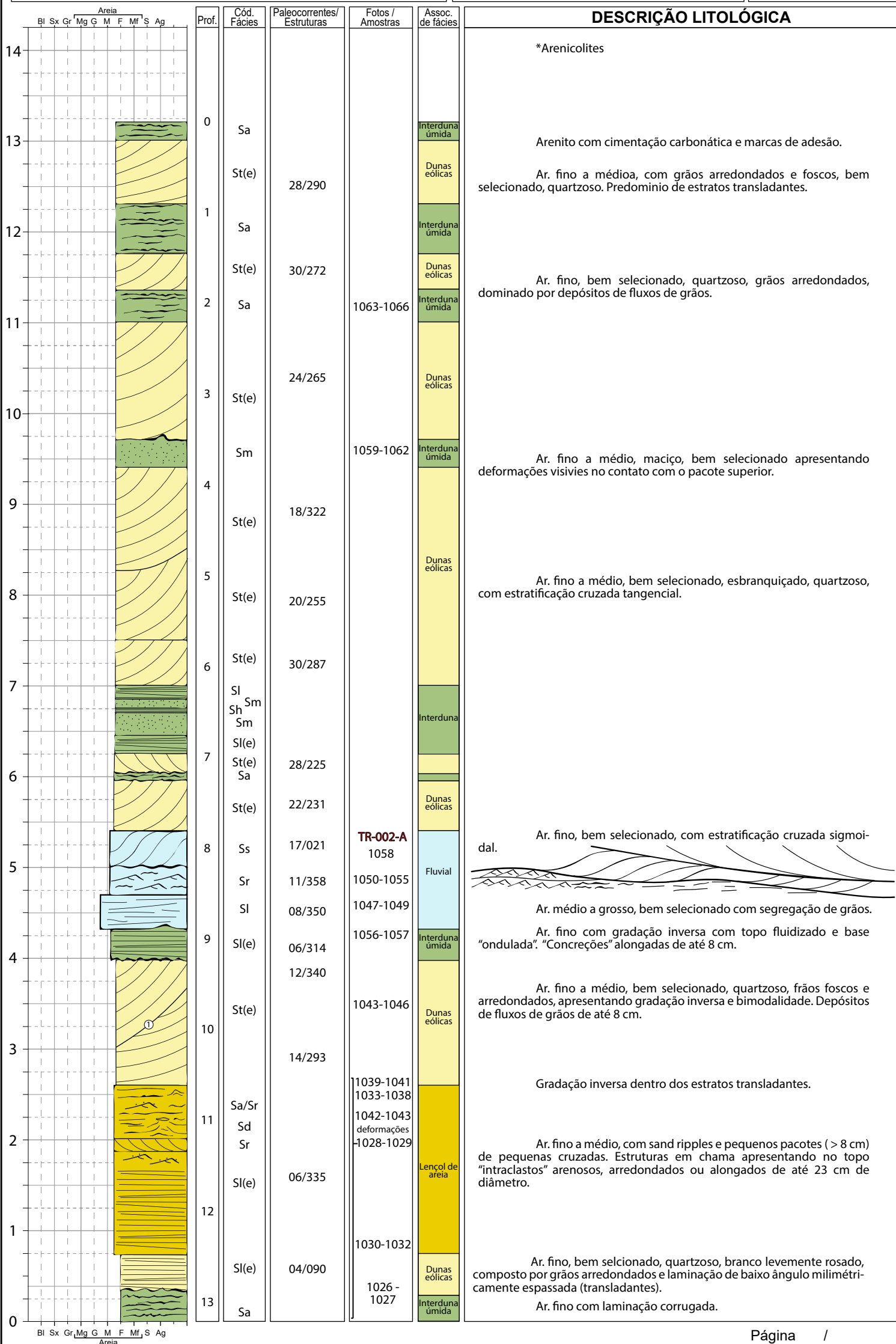
Coord. **112m**

E: - 42.852691

N: - 6.245073

Data: 11/11/2019

Escala: 1:50



COLUNA ESTRATIGRÁFICA

SEÇÃO/UNIDADE: Escadaria / Amarante

NOMES: Rossano e Carrel

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

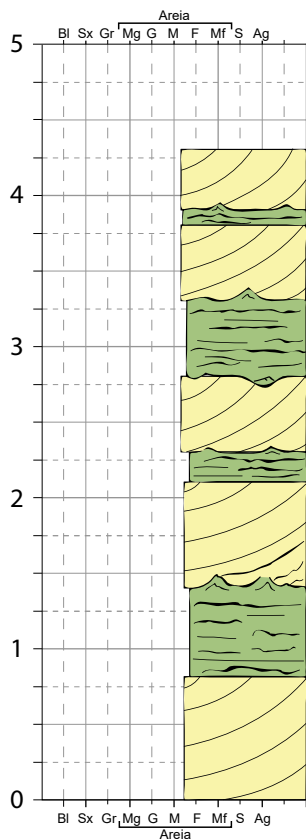
Ponto: TR_002-1

Coord. 116m
E: - 42.852536

N: - 6.245073

Data: 11/11/2019

Escala: 1:50



Prof.	Cód. Fácies	Paleocorrentes/ Estruturas	Fotos / Amostras	Assoc. de fácies
0	St(e)	28/324		Dunas eólicas
	Sa	22/296		Dunas eólicas
1	Sa			Interduna úmida
	St(e)	16/318		Dunas eólicas
2	Sa			Interduna úmida
	St(e)	22/298		Dunas eólicas
3	Sa			Interduna úmida
4	St(e)	14/345		Dunas eólicas

DESCRIÇÃO LITOLÓGICA

Base erosiva e topo deformado (fluidizado).

Deformações no topo.

Ar. fino a médio, bem selecionado, quartoso, grãos arredondados, branco avermelhado, com estratificação tangencial.

Ar. fino, branco, quartoso, bem selecionado, com laminação corrugada deformações no topo.

Ar. fino a médio, bem selecionado, branco, quartoso composto pro grãos bem arredondados. Domínio de estratos transladantes.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

SEÇÃO/UNIDADE: Escadaria / Amarante

NOMES: Rossano e Carrel

ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS HIDRODINÂMICOS OU DEFORMACIONAIS

M Maciço		E. Cruzada Planar		Fluidização
		E. Cruz. Tangencial		Lam. Convoluta
		E. Cruz. Acanalada		Escorregamento
		Lam. Ondulada Truncada		
		Estrutura de Carga		
		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

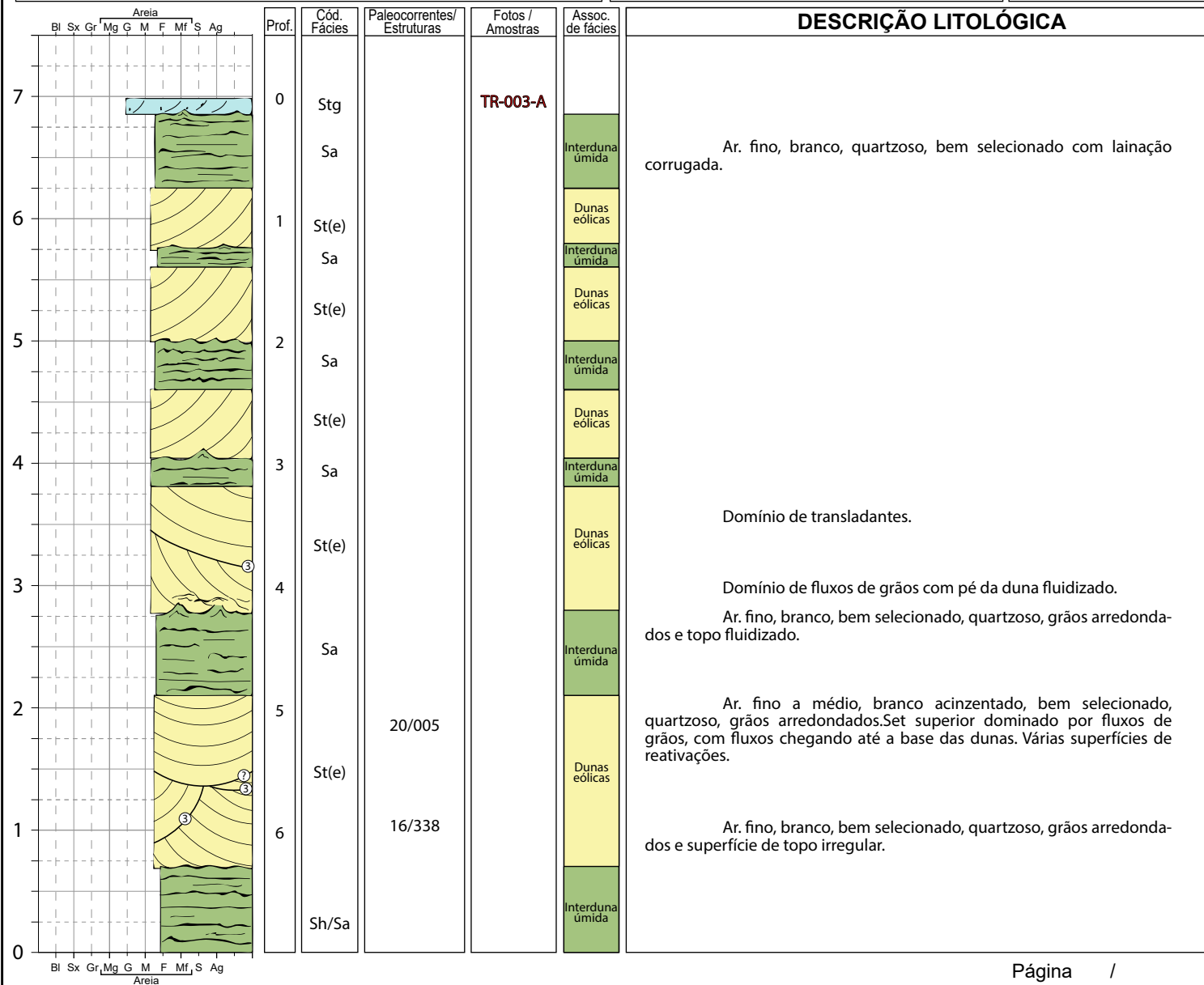
Ponto: **TR_003**

Coord. **114m**
E: - 42.852319

N: - 6.244684

Data: 11/11/2019

Escala: 1:50



COLUNA ESTRATIGRÁFICA

SEÇÃO/UNIDADE: Escadas (abaixo)

NOMES: Rossano e Manu

ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS HIDRODINÂMICOS OU DEFORMACIONAIS

- M Maciço
- ≡ Lam. Plano Paralela
- ↖↗ Lam. Cruz. de ripples
- ↖↗ Ripples assimétricas
- ↖↗ Ripples simétricas
- ↖↗ E.Cruz. Baixo Ângulo
- ≡ E. Cruzada Planar
- ≡ E. Cruz. Tangencial
- ≡ E. Cruz. Acanalada
- ≡ Lam. Ondulada Truncada
- ≡ Estrutura de Carga
- ≡ Estrutura em Chama
- ∩ Fluidização
- ∩ Lam. Convoluta
- ∩ Escorregamento
- ①③ Ordem da superfície eólica

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

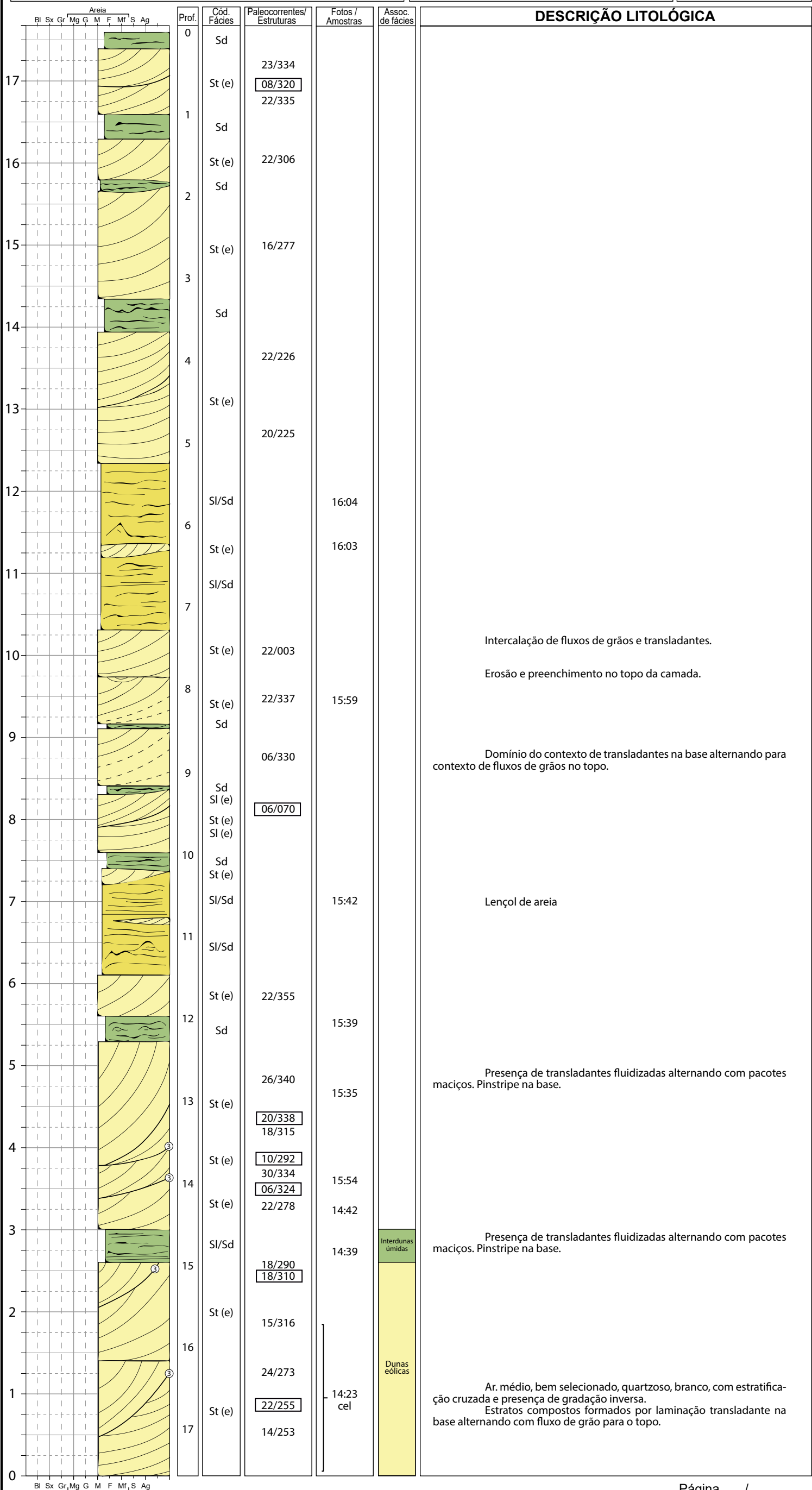
Ponto: **TR_004**

Coord. UTM
E: **-42.851829**

N: **-6.246333**

Data: **17/03/2020**

Escala: **1:50**



Intercalação de fluxos de grãos e transladantes.

Erosão e preenchimento no topo da camada.

Domínio do contexto de transladantes na base alternando para contexto de fluxos de grãos no topo.

Lençol de areia

Presença de transladantes fluidizadas alternando com pacotes maciços. Pinstripe na base.

Presença de transladantes fluidizadas alternando com pacotes maciços. Pinstripe na base.

Ar. médio, bem selecionado, quartzoso, branco, com estratificação cruzada e presença de gradação inversa. Estratos compostos formados por laminação transladante na base alternando com fluxo de grão para o topo.

