

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**EOLIANITOS QUATERNÁRIOS DE LUÍS CORREIA (PI) E TRAIRI (CE):
CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E EVOLUÇÃO EODIAGENÉTICA EM
DEPÓSITOS MISTOS TERRÍGENO-CARBONÁTICOS**

Renata Cagliarani

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2015 / 49)

SÃO PAULO
2015

TF
C131
R.e

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**EOLIANITOS QUATERNÁRIOS DE LUÍS CORREIA (PI) E TRAIRI (CE):
CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E EVOLUÇÃO EODIAGENÉTICA EM
DEPÓSITOS MISTOS TERRÍGENO-CARBONÁTICOS**

Renata Cagliarani
Renata Cagliarani

De acordo *Paulo*
Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2015 / 49)**

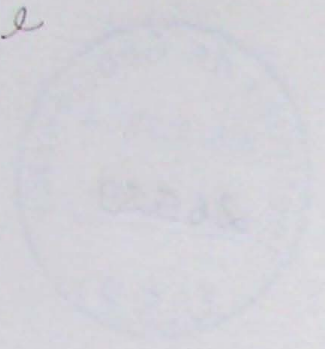
IGc-Instituto de Geociências



Eolianitos quaternários de Luís Correia (PI) e Trairi (CE) :
caracterização petrográfica e evol
M26529

SÃO PAULO
2015

TF
C131
R.2



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPÓSITOS MISTOS TERRIGÊNO-CARBONÁTICOS
CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E EVOLUÇÃO EGDAGENÉTICA EM
EOLANITOS QUATERNÁRIOS DE LUIS CORREA (PI) E TRAPICHE

Renato Capistrano

Renato Capistrano

De acordo

De acordo

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Clotário

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2015/149)

SÃO PAULO
2015

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Paulo César Fonseca Giannini, por ter me acolhido no mundo científico, mostrando-me o magnífico universo sedimentológico. Obrigada por compartilhar sua sabedoria e muitas de suas horas trabalhando comigo. Agradeço também pela ternura e bom humor. Essa experiência foi incrível!

Aos companheiros de campo Valentina Espinel e Vinícius Mendes e às queridas congressistas Helena Andrade e Fernanda Rodrigues pela ajuda e por compartilharem bons momentos neste arenoso ambiente.

Aos colegas dos diversos laboratórios do IGc-USP por terem contribuído com os resultados deste trabalho:

Aos estagiários técnicos Caio Jara e Dayvison Nunes, do Labsed, pela ajuda com a dosagem de carbonato e a impregnação das amostras.

À Jordana Zampelli, do Labpetro, pela ajuda na análise granulométrica, bem como na utilização da lupa e do microscópio óptico. Agradeço também pelos inúmeros momentos de descontração e boas energias.

Às técnicas laboratoristas Luciana Souza e Thays Mineli e ao professor André Sawakuchi, do Legal, pelo auxílio nos procedimentos de datação por LOE.

Ao Isaac Sayeg, do Labmev, e ao Marcos Mansueto, do Laboratório de Microsonda Eletrônica, pela preparação das amostras e suporte nas análises por MEV.

Ao pessoal da Seção de Laminação, pela confecção das seções delgadas.

Agradeço também aos amigos de turma e demais estudantes e cientistas, docentes e funcionários do IGc-USP, pelas experiências gratificantes ao longo destes 5 anos.

À minha família, meus pais Almir e Zilda, e meu irmão, Willian, por todo apoio que sempre me deram em minhas decisões e conquistas, por me fortalecerem nos momentos mais difíceis e por serem meu exemplo de vida ao irradiarem tanto amor, carinho e boas risadas.

Este trabalho foi financiado em parte pelo Auxílio à Pesquisa FAPESP (Processo 2009/54232-4), pelo CNPq, através da bolsa de produtividade do orientador, e pelo Programa de Formação de Recursos Humanos da Petrobras (PFRH-241), do qual fui bolsista de Iniciação Científica.

Renata

RESUMO

CAGLIARANI, R. **Eolianitos quaternários de Luís Correia (PI) e Trairi (CE): caracterização petrográfica e evolução eodiagenética em depósitos mistos terrígeno-carbonáticos**. 2015. 61 f. Monografia de Trabalho de Formatura - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Eolianitos constituem depósitos de areia eólica porosos, promissores como rochas reservatórios. O escopo deste trabalho é aprofundar o conhecimento sobre as feições e processos deposicionais materializados nos eolianitos brasileiros, a partir de estudos geomorfológicos, sedimentológicos e petrográficos. As duas áreas de estudo localizam-se no litoral nordestino, uma no município de Luís Correia, Piauí, e outra em Trairi, Ceará. Os eolianitos analisados apresentam-se como cordões descontínuos de altura decimétrica a decamétrica, paralelos à direção do vento efetivo e oblíquos à costa. Seu padrão bimodal de distribuição de azimutes de estratificações cruzadas, transversal ao eixo dos cordões, é análogo ao de rastros lineares residuais de paleodunas, feição típica de planície deflacionária. Ao microscópio, apresentam-se como rochas grão-suportadas, bastante porosas (até 38%) e pouco cimentadas (< 15%), de composição mista, mais ricas em terrígenos do que em bioclastos, dentre os quais predominam algas vermelhas coralíneas. Esta composição reflete sua área-fonte, já que a plataforma continental adjacente é rica em bioclastos, na sua porção média e externa, mas dominada internamente por terrígenos. A diagênese é precoce, como evidenciado pelo empacotamento aberto, sem indícios de processos diagenéticos mais avançados. O cimento carbonático, em forma de franjas envoltentes anisópacas microespáticas, com pêndulos ou meniscos, aponta para eodiagênese em condições de insaturação de poros em água, portanto, na zona meteórica vadosa. O cimento, composto por calcita de baixo Mg (1 a 4 mol % MgCO_3), provém da dissolução de bioclastos seguida de reprecipitação *in loco*, como sugerido pela sua distribuição preferencial em torno de clastos carbonáticos. Em comparação com os eolianitos de Luís Correia, as amostras de Trairi apresentam relativa imaturidade mineralógica e textural, interpretada como reflexo da maior proximidade da área-fonte, seja pela deriva litorânea regional, rumo W, seja pela menor distância à praia e maior aporte eólico relativo (saturação do sistema eólico em areia).

Palavras-chave: paleodunas calcárias, planície deflacionária, rastros lineares residuais, dunas costeiras, eodiagênese, cimento vadoso

ABSTRACT

CAGLIARANI, R. **Quaternary eolianites of Luís Correia (PI) and Trairi (CE): petrographic characterization and early diagenetic evolution of mixed terrigenous-carbonate deposits**. 2015. 61 f. Monografia de Trabalho de Formatura - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Eolianites are commonly characterized as potential reservoirs rocks of hydrocarbons and groundwater. This case study aims to contribute to knowledge about depositional features and processes of Brazilian eolianites (states of Piauí and Ceará, in the northeast coast), based on geomorphologic setting and petrographic characterization. The eolianite deposits form elongate and discontinuous bodies, from few centimeters to tens of meters high. These bodies are parallel to effective wind direction and transversal to the coastline. Cross stratification azimuth distribution pattern is bimodal and the eolianite ridge direction matches the axis of bisectrix between these two modes. It is analogous to patterns found in trailing ridges, typically located in deflation plain. In thin-sections, eolianites appear as grain-supported rocks, with high porosity (up to 38%) and poorly cementation (<15%). They present mixed terrigenous-carbonate composition, with predominance of quartz over red coralline algae. This composition results from source area, since the middle and outer adjacent continental shelf has abundant bioclasts, while inner shelf is dominated by terrigenous. Early diagenetic processes occurred in vadose zone, as indicated by carbonate pendulous and meniscus cements. Carbonate cement is composed of low-Mg calcite (1 to 4 % mole $MgCO_3$) and it was generated by dissolution of bioclasts and reprecipitation *in situ*, as suggested by preferential distribution of cement around carbonate clasts. Eolianite deposits in Ceará vary considerably in composition and texture compared to Piauí. Rock samples of Ceará are relatively more mineralogically and texturally immature, which is interpreted as a consequence of closer source area, due to net longshore drift, from E to W, and/or shorter distance to the beach.

Keywords: calcareous dunes, deflation plain, trailing ridges, coastal dunes, early diagenesis, vadose cement, rizoliths

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem de satélite do campo de dunas entre as praias de Carnaubinha e Maramar, em Luís Correia (PI). Os afloramentos visitados estão indicados em vermelho. Fonte: <i>Google Earth</i> , imagens <i>DigitalGlobe</i> e <i>TerraMetrics</i> (2015).	4
Figura 2. Imagem de satélite do campo de dunas entre as praias de Imboaca, a NW, e Guajiru, a SE, em Trairi (CE). Os afloramentos visitados estão indicados em vermelho. Fonte: <i>Google Earth</i> , imagens <i>DigitalGlobe</i> e <i>TerraMetrics</i> (2015).	5
Figura 3. Distribuição global de eolianitos carbonáticos quaternários. Em vermelho, está pontuada a área dos eolianitos deste estudo. Modificado de Brooke (2001).	6
Figura 4. Mapa faciológico dos sedimentos superficiais da plataforma e da sedimentação quaternária no oceano profundo entre os estados do Piauí e Ceará. Fonte: Kowsmann & Costa (1979).	7
Figura 5. Distribuição de precipitação diária, acumulada (gráfico superior) e simples (diagrama de barras inferior), no ano de 2014, e de precipitação média no período 1997-2014 (curva inferior), na região 33 (costa do Piauí e oeste do Ceará). Médias compiladas de dados do INMET, INPE e Centros Estaduais de Meteorologia. Fonte: CPTEC/INPE.	8
Figura 6. Cordão de eolianito em Maramar, Luís Correia, próximo ao afloramento EPI-32.	16
Figura 7. Cordões de eolianitos adjacentes à praia de Imboaca, Trairi (ECE-58).	16
Figura 8. Cordão de eolianito em Guajiru, Trairi. Próximo ao afloramento EPI-56.	17
Figura 9. Cordões de eolianitos em Maramar, próximo ao afloramento EPI-29. Notar contraste entre os cordões baixos, submétricos a métricos, situados em meio ao lençol de areia da porção proximal do sistema eólico costeiro (em primeiro plano na foto) e os mais altos, decamétricos, na zona de deflação (montes visíveis no fundo da foto).	17
Figura 10. Praia de Maramar (PI), ao fundo, ladeada por lençol de areia extenso, formado por rupturas de deflação arrasadas e mares de <i>nebkhas</i> assimétricos ("dunas de sombra"). Próximo ao afloramento EPI-26.	18
Figura 11. Rastros lineares e cordões de eolianitos em meio à extensa planície de deflação vegetada. A praia de Maramar está orientada à esquerda da foto. Próximo ao afloramento EPI-25E.	18
Figura 12. Campo de dunas barcanoides em Luís Correia.	19
Figura 13. Configuração morfológica em Imboaca, Trairi. Notar contraste de vegetação entre duna incipiente irregular (DFI) e duna frontal estabelecida em rampa (DFE). Afloramento ECE-54.	19
Figura 14. Configuração morfológica em Guajiru, Trairi. Os eolianitos situam-se após dunas frontais estabelecidas (DFE), em meio à <i>blowouts</i> e esparsos <i>nebkhas</i> . Afloramento ECE-57.	20
Figura 15. Fácies deposicionais identificadas em Maramar, Luís Correia, todas constituídas por arenitos bioclásticos de areia fina a média: com estratificação cruzada de ângulo baixo e rizoconcreções abundantes (AFMcb - afloramento EPI-25); com estratificação cruzada de ângulo baixo e rizoconcreções escassas a ausentes (AFMcb - EPI-31); e com estratificação cruzada de ângulo alto e rizoconcreções escassas a ausentes (AFMca - EPI-32). Notar detalhe das rizoconcreções da fácies AFMcb em destaque (foto inferior esquerda).	21
Figura 16. Histogramas circulares de azimutes de estratificação cruzada dos eolianitos em Luís Correia e Trairi. Notar que a direção dos cordões (linhas tracejadas em vermelho) está na bissetriz das duas modas.	22
Figura 17. Fácies deposicionais identificadas em Trairi, ambas constituídas por arenitos bioclásticos de areia média a grossa com rizoconcreções escassas a ausentes. AMGcb - arenito com cruzada de ângulo baixo (afloramento ECE-55); AMGca - arenito com cruzada de ângulo alto (ECE-58). Notar truncamento de cruzadas de ângulos diferentes (foto inferior).	22
Figura 18. Variação do teor de carbonato em função da distância à costa. Sedimentos praias em amarelo e laranja. Eolianitos de Luís Correia em roxo e de Trairi, em vermelho. I corresponde ao setor Imboaca e G, a Guajiru. Linha de tendência em vermelho: $r = -0,818$ e $p = 0,005$; linha de tendência em verde: $r = -0,987$ e $p = 0,0004$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.	24

Figura 19. Variação granulométrica no sistema eólico costeiro de Maramar, Luís Correia. Amostras de praia em amarelo, demais pontos, eolianitos. As amostras foram previamente submetidas a ataque ácido. Notar tendências de afinamento (linhas tracejadas). Linha de tendência em vermelho: $r = 0,975$ e $p = 0,008$; linha de tendência em verde: $r = 0,998$ e $p = 0,0004$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.....	25
Figura 20. Variação granulométrica no sistema eólico costeiro de Trairi. Amostras de praia em amarelo e eolianitos em vermelho. As amostras foram previamente submetidas a ataque ácido. I corresponde ao setor Imboaca e G, Guajiru.	26
Figura 21. Desvio padrão do diâmetro médio das amostras em estudo. Sedimentos de praia em amarelo e laranja. Eolianitos de Luís Correia em roxo e de Trairi, em vermelho. I - Imboaca e G - Guajiru. Linha de regressão linear em verde, para todo o conjunto de amostras de eolianito: $r = -0,589$ e $p = 0,0000$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.	26
Figura 22. Variação da assimetria das amostras em estudo. Sedimentos de praia em amarelo e laranja. Eolianitos de Luís Correia em roxo e de Trairi, em vermelho. I corresponde ao setor Imboaca e G, Guajiru. Notar tendências de diminuição da assimetria (linhas tracejadas). Linha de tendência em vermelho: $r = -0,954$ e $p = 0,008$; linha de tendência em verde: $r = -0,871$ e $p = 0,0000$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.	27
Figura 23. Alguns aspectos do arcabouço terrígeno dos eolianitos em estudo: a. grãos subangulosos de quartzo, associados a bioclastos arredondados de algas vermelhas (amostra EPI-33E); b. grão de areia grossa de quartzo policristalino, com arranjo interno em mosaico (EPI-33E); c. microclínio com aspecto "sujo", indício de dissolução prévia (ECE-55E); d. corte basal de grão de piroxênio (ECE-55E). Fotomicrografias a, b e c a nicóis cruzados e d a nicóis paralelos.	29
Figura 24. Bioclastos presentes nos eolianitos: a. alga vermelha coralínea (amostra ECE-58E); b. bivalve, com dupla face calcita-aragonita (EPI-33E); c. testa micrítica de foraminífero bentônico miliolídeo (EPI-32E); d. foraminífero bentônico fusulinídeo (ECE-58E); e. espinho de equinoide, em seção basal (ECE-58E); f. craca ou coral (EPI-33E). Fotomicrografias a nicóis paralelos. Continua.....	30
Figura 25. Feições texturais: a. paralelismo entre grãos, mais perceptível entre bioclastos alongados, como bivalves (amostra EPI-34EB); b. grãos mais finos em faixa central, delineando laminação risca de agulha (ECE-55E). Fotomicrografias a nicóis paralelos.....	32
Figura 26. Feições de poro e cimento: a. porosidade móldica (amostra EPI-35E); b. algas corroídas com franja de cimento delgada (ECE-58); c. franja envolvente anisópaca (EPI-32E); d. cimento anisópaco pendular, em grãos de quartzo e carbonato (EPI-29E); e. cimento em menisco (EPI-33E); f. preenchimento intersticial espático (EPI-29E); g. cimento desenvolvido preferencialmente ao redor de bioclastos (EPI-32E); h. película escura sobre grão de quartzo (EPI-33E). Fotomicrografia a, b e h a nicóis paralelos, demais a nicóis cruzados.....	33
Figura 27. Fotomicrografia e eletromicrografia de retroespalhados com indicação das microanálises quantitativas por MEV-EED de cimento e alga vermelha (amostra EPI-28E). 35	
Figura 28. Evaporação (mm) em Teresina (PI). Dados compilados de 1931 a 1990 pelo INMET. Notar maior evaporação nas três décadas mais recentes dentro do intervalo de tempo compilado.	38
Figura 29. Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil. Notar que as estações com menos precipitação concentram os ventos mais fortes. Extraído de Amarante <i>et al.</i> (2001).	39
Figura 30. Zonas diagenéticas em regiões costeiras. A zona vadosa pode ser dividida em zona de infiltração e zona de percolação gravitacional. Traduzido de Scholle & Ulmer-Scholle (2003).....	41
Figura 31. Tipos de cimento conforme zonas meteóricas. Traduzido de Scholle & Ulmer-Scholle (2003).	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação de amostras coletadas e respectivas análises realizadas.	10
Tabela 2. Síntese das fácies deposicionais dos eolianitos em estudo.	21
Tabela 3. Idades LOE das amostras de Luís Correia, referentes a anos antes de 2014.	23
Tabela 4. Idades ^{14}C AMS das amostras de eolianitos estudadas. Os valores A.P referem-se a anos antes de 1950.	23
Tabela 5. Teor de carbonato (% em massa) de amostras de eolianitos e areias de praia. ..	23
Tabela 6. Estimativa modal de componentes dos eolianitos em estudo.	27
Tabela 7. Composições modais, em %, dos eolianitos em estudo.	28
Tabela 8. Síntese das considerações sobre a petrografia dos eolianitos deste estudo.	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativas e metas	2
1.2. Localização das áreas de estudo	3
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS	8
3.1. Trabalho de campo	8
3.2. Teor de carbonato (ataque ácido)	9
3.3. Ensaio de granulometria	10
3.4. Preparação das seções delgadas	11
3.5. Análise petrográfica via óptica	11
3.6. Microscopia eletrônica de varredura	12
3.7. Datações	13
3.8. Classificação petrográfica	13
3.9. Tratamento de dados	13
4. RESULTADOS	14
4.1. Fácies morfológicas	14
4.2. Fácies deposicionais	20
4.3. Datações	23
4.4. Teor de carbonato	23
4.5. Granulometria	24
4.6. Petrografia óptica	27
4.6.1. Constituintes do arcabouço	27
4.6.2. Trama e textura do arcabouço	31
4.6.3. Cimento e poros	32
4.6.4. Classificação petrográfica	32
4.7. Composição do cimento carbonático	34
5. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES	36
5.1. Evolução deposicional	36
5.2. Evolução eodiagenética	40
5.3. Variações entre os eolianitos de Luís Correia e Trairi	43
5.4. Efeito da diagênese nas características do reservatório	44
6. CONCLUSÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXOS	50

1. INTRODUÇÃO

O termo “eolianito” foi introduzido por Sayles (1931, *apud* Brooke, 2001), em um estudo nas Ilhas Bermudas, para designar qualquer depósito sedimentar consolidado gerado pelo vento, independentemente de sua composição. Fairbridge & Johnson (1978) e Abegg *et al.* (2001) usam como critério a distribuição composicional de grãos do arcabouço para diferenciar “eolianitos quartzosos” (<50% CaCO_3) de “eolianitos carbonáticos” (>50% CaCO_3). Como destacado por Brooke (2001) e Pye & Tsoar (2009), este termo tem sido ampla e preferencialmente utilizado para depósitos quaternários eólicos cimentados por calcita diagenética precoce. Segundo Pye & Tsoar (2009), sinônimos de uso regional incluem *kurkar* (Israel), *grès donaire* (África do Norte francesa), *miliolite* (Índia e Golfo Pérsico), *dune limestone*, *aeolian limestone* e *dune rock* (Austrália). Na costa do Piauí e Ceará, as ocorrências de eolianitos são popularmente conhecidas como “cascudos”, nome que faz alusão à cimentação superficial.

Eolianitos de zonas costeiras são formados pelo retrabalhamento de acumulações de areias biogênicas (Fairbridge & Johnson, 1978; Tucker & Wright, 1990; Pye & Tsoar, 2009). Em vista desta origem, refletem controle exercido pelo clima e pelo nível relativo do mar (NRM) na sua formação (Brooke, 2001). Este controle manifesta-se de dois modos: no acúmulo, junto à costa, de material carbonático biogênico, incoeso; e na exposição deste material à ação de ventos com competência para transportá-los.

O mecanismo principal de estabilização das dunas que formam os eolianitos é a cimentação precoce por carbonato, a qual pode ser determinada por outros fatores além daqueles três comumente atuantes na fixação de dunas terrígenas, isto é, umidade elevada, crescimento de vegetação e impregnação por matéria orgânica pedogênica (Brooke, 2001). Neste contexto, não se sabe ainda se a cimentação dos eolianitos brasileiros é favorecida por fases mais secas, de nível freático relativamente baixo, à semelhança de calcretes, ou por fases úmidas, como em muitas dunas terrígenas tropicais; e este é um tema para ser investigado, inclusive neste trabalho, via análise de fácies e microfácies/petrofácies. Seja como for, a cimentação carbonática precoce aumenta a resistência dos eolianitos recém-formados aos eventos erosivos superimpostos e eleva assim o seu potencial de preservação ao longo do tempo. Em parte por esta razão, eolianitos quaternários podem apresentar estratigrafia mais completa e complexa que os sítios de sedimentação eólica terrígena, como bem exemplificado na costa oeste da Austrália (Hearty & O’Leary, 2008). São passíveis, portanto, de informar sobre a sedimentação eólica durante períodos em que o registro eólico terrígeno esteja escasso ou ausente.

Frebourg *et al.* (2008) advertem que a suposta raridade de eolianitos pré-quaternários pode ser resultado de um viés de interpretação, já que no Quaternário, diferentemente de períodos mais antigos, a origem eólica estaria demonstrada pela

preservação das formas dunares. Além disso, em dunas carbonáticas, dois dos critérios clássicos de identificação da origem eólica - granulação fina e boa seleção granulométrica das areias - deixariam de ser obrigatórios, haja vista a diversidade de formas e a menor densidade das testas e carapaças ocas que as constituem. Assim, é possível que parte dos eolianitos antigos seja confundida com depósitos subaquosos. Os mesmos autores assinalam ainda que calciarenitos bioclásticos ou oolíticos com evidências de diagênese vadosa e de atuação de processos pedogenéticos seriam sugestivos de origem eólica.

Os eolianitos quaternários da costa brasileira, diferentemente da maioria das ocorrências do mesmo período em outras partes do mundo (Brooke, 2001), são de latitudes baixas, entre 2 e 4°, próximas à linha do Equador. Situam-se nos Estados do Piauí e do Ceará e no Arquipélago Fernando de Noronha (AFN), onde se associam aos ventos alísios da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Sua distribuição geográfica está ligada à disponibilidade de carbonatos na plataforma continental interna (Kowsmann & Costa, 1979) ou plataforma de abrasão adjacente, mobilizados para dentro do continente pela ação das ondulações e, num segundo momento, dos alísios locais.

Carvalho *et al.* (2008) consideram que as ocorrências brasileiras foram formadas em períodos de nível do mar inferior ao atual, sem explicitar, porém, as evidências ou raciocínio utilizados para essa dedução, e sugerem que o processo de cimentação teria sido semelhante ao que ocorre na formação de calcretes, mas faltam ainda evidências petrográficas claras a respeito.

1.1. Justificativas e metas

O foco deste estudo é a caracterização petrográfica e a reconstituição da evolução eodiagenética de duas ocorrências de eolianitos holocênicos na faixa litorânea dos Estados do Piauí e Ceará.

A presença de eolianitos no Brasil já foi mencionada em trabalhos na costa continental nordestina (Carvalho *et al.*, 2008) e no AFN (Angulo *et al.*, 2013). Entretanto, estudos sedimentológicos e petrográficos de detalhe ainda não foram bem explorados, sendo este um dos escopos deste trabalho. Novos dados sobre estes aspectos são imprescindíveis para aprofundar o conhecimento sobre as feições e processos deposicionais materializados nos eolianitos e o contexto geológico e ambiental favorável para sua formação.

A petrografia dos eolianitos quaternários brasileiros possui, além do interesse acadêmico, bom potencial de aplicação: eolianitos geralmente constituem corpos de areia porosa promissores como rochas reservatórios e servem como modelos modernos para o armazenamento de água subterrânea (Smith *et al.*, 2012) e de hidrocarbonetos (Frebou, 2010). Demonstrar o efeito da eodiagenese na distribuição espacial dos poros e inferir as condições de cimentação precoce no que se refere à posição relativa do nível freático

permitirá construir modelos deposicional e de evolução diagenética e discutir sua aplicação a reservatórios.

Dentro deste quadro, duas grandes questões sobre a origem dos eolianitos na costa continental brasileira podem ser enunciadas como motivações ou metas para este Trabalho de Formatura: 1. Por que depósitos eólicos ricos em grãos carbonáticos se depositaram ou se concentraram em certos locais e em certos períodos? 2. Como e quando ocorre a estabilização e a diagênese destes depósitos e de que modo esta diagênese interfere nas suas características de reservatório?

Para alcançar as propostas apresentadas, foram estabelecidos os seguintes objetivos: 1. definir a distribuição tempo-espacial das ocorrências, com caracterização de fácies deposicionais, microfácies e petrofácies, estas últimas através da descrição da textura, da mineralogia e da petrografia do arcabouço, da porosidade e das feições diagenéticas (dissolução, compactação e cimentação); 2. investigar a influência da dissolução e cimentação carbonática precoces nas características do reservatório e delimitar a cronologia relativa dos eventos diagenéticos que afetaram os sedimentos; 3. descrever a história de formação dos eolianitos, desde a deposição até a sua configuração atual, incluindo questões sobre quando e como se dá a iniciação dos campos de dunas em que eles se encontram e qual feição morfológica representam.

1.2. Localização das áreas de estudo

Como áreas alvos, foram escolhidos os campos de dunas entre as praias de Carnaubinha e Maramar (Figura 1), no município de Luís Correia, Piauí, e Imboaca e Guajiru (Figura 2), no município de Trairi, costa oeste do Ceará.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

Na distribuição de eolianitos em âmbito global, destacam-se as zonas costeiras da Austrália, África do Sul, Bahamas, Bermudas e partes do Mediterrâneo (Brooke, 2001), com concentração em áreas de média latitude, entre 20 e 40° (Figura 3). Esses corpos são reconhecidos principalmente no Quaternário, com raras descrições de ocorrências mais antigas.

Eolianitos ocorrem amplamente em ilhas oceânicas e zonas costeiras continentais áridas a semiáridas, onde o aporte de sedimentos siliciclásticos é restrito e as taxas de produção de carbonato biogênico ou de formação de ooides são altas (Pye & Tsoar, 2009).

Não por coincidência, as principais ocorrências de eolianitos até agora identificadas no Brasil situam-se adjacentes a regiões da plataforma continental interna ricas em carbonatos bioclásticos (Figura 4), entre os estados do Piauí e Ceará (Carvalho *et al.*, 2008) e no AFN (Angulo *et al.*, 2013).

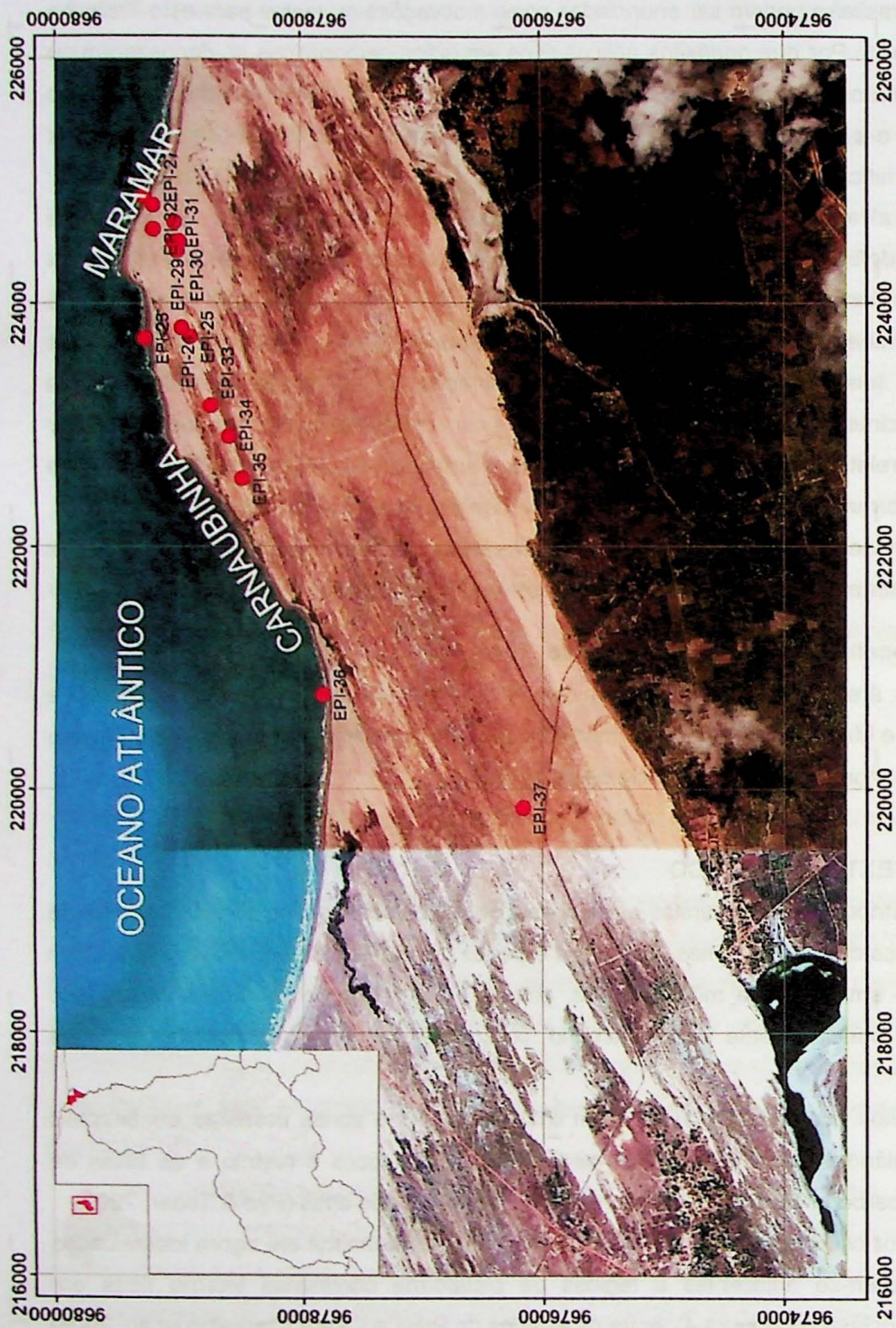


Figura 1. Imagem de satélite do campo de dunas entre as praias de Carnaubinha e Maramar, em Luís Correia (PI). Os afloramentos visitados estão indicados em vermelho. Fonte: Google Earth, imagens DigitalGlobe e TerraMetrics (2015).



Figura 2. Imagem de satélite do campo de dunas entre as praias de Imboaca, a NW, e Guajiru, a SE, em Trairi (CE). Os afloramentos visitados estão indicados em vermelho. Fonte: Google Earth, imagens DigitalGlobe e TerraMetrics (2015).

O relevo da costa do Piauí e Ceará compreende uma planície litorânea com cotas de até poucas dezenas de metros (por exemplo, 10 m, na área urbanizada de Luís Correia, e 30m, na de Trairi) e chapadas baixas, com topo aplainado ou suavemente ondulado, cujas altitudes alcançam até 250 m (Vasconcelos *et al.*, 2004).

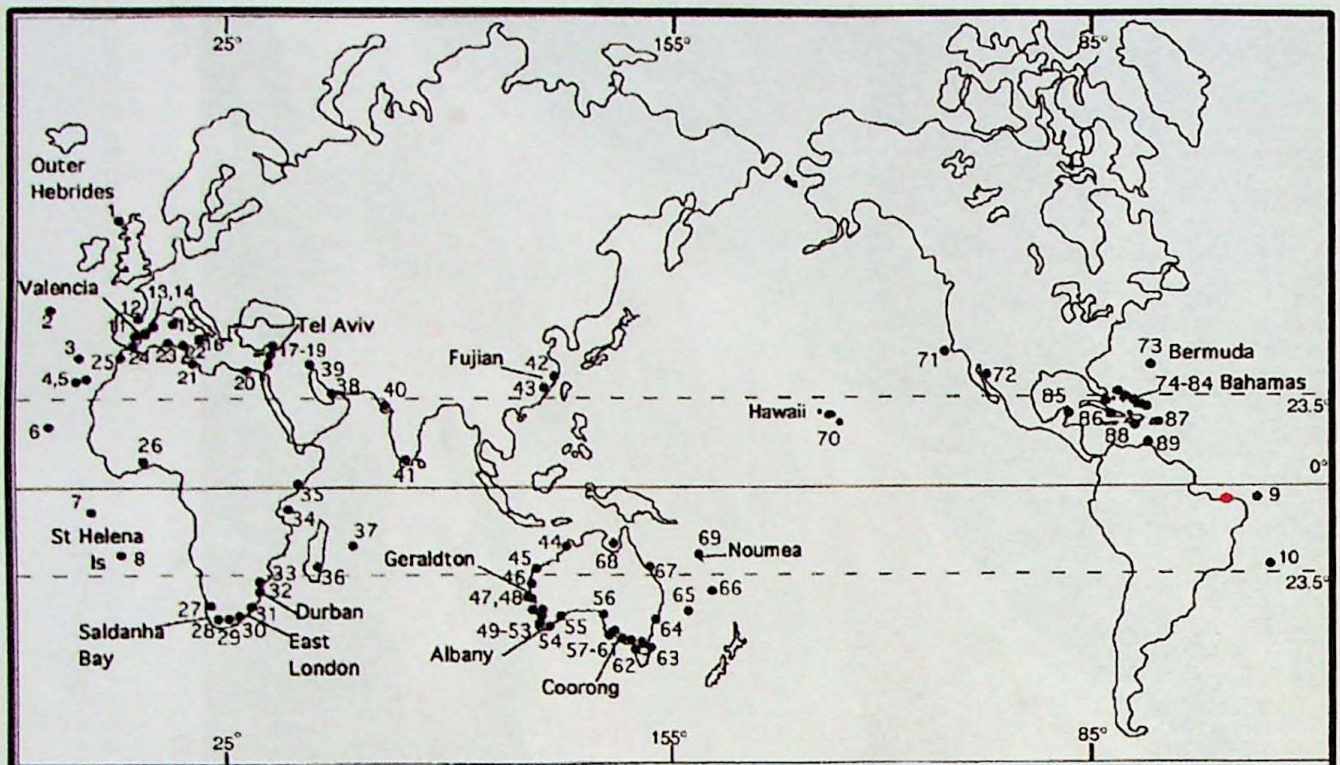


Figura 3. Distribuição global de eolianitos carbonáticos quaternários. Em vermelho, está pontuada a área dos eolianitos deste estudo. Modificado de Brooke (2001).

A planície litorânea é composta por depósitos sedimentares inconsolidados de areias finas a grossas de praias, dunas frontais ou *nebkhas* e dunas livres e por depósitos semi-consolidados de paleodunas (Vasconcelos *et al.*, 2004) e inclui desembocaduras flúvio-estuarinas e de canais de escoamento de maré, com manguezais e turfas associados. Lagos remanescentes de antigos estuários são frequentes em meio à planície litorânea, e resultam da obstrução de drenagens costeiras pelo avanço ao interior de dunas e paleodunas.

As chapadas baixas correspondem a coberturas sedimentares da Formação Barreiras, de idade miocênica, compostas por arenitos e conglomerados intercalados com siltitos e argilitos (Vasconcelos *et al.*, 2004). Sobre os ferricretes que marcam o topo da Formação Barreiras, ocorrem localmente depósitos sedimentares areno-cascalhosos conhecidos como “pós-Barreiras”, cujas areias incluem, provavelmente, os primeiros depósitos eólicos costeiros do Quaternário na região.

As rochas graníticas e metamórficas pré-cambrianas que formam o embasamento só afloram mais ao interior do continente, variando entre 20 e 60 km da costa (Vasconcelos *et al.*, 2004).

O clima nordestino é influenciado pela dinâmica da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), faixa de umidade atraída para zonas de aumento de temperatura. A

ZCIT tem variação anual, com posição mais ao norte durante o verão boreal e mais ao sul durante o verão austral (Cavalcanti *et al.*, 2009). O litoral do Piauí e Ceará encontra-se pouco a norte da posição meridional máxima da ZCIT, no verão austral. Apresenta clima quente tropical com verão úmido e inverno seco, tendo chuvas concentradas entre janeiro e maio e precipitação média anual menor que 1200 mm (Figura 5). As temperaturas são bastante estáveis ao longo do ano, variando geralmente entre 25 e 30°C.

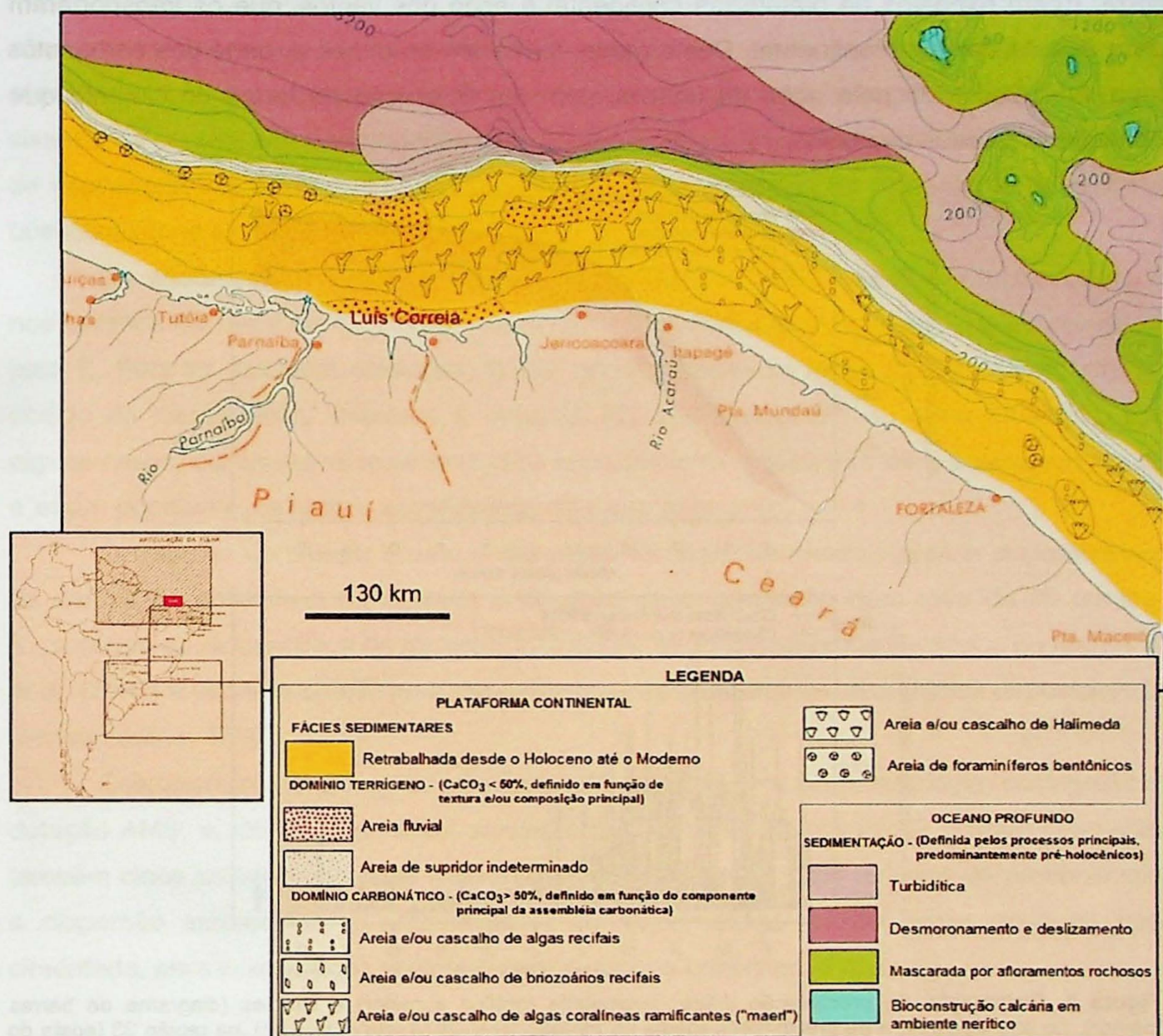


Figura 4. Mapa faciológico dos sedimentos superficiais da plataforma e da sedimentação quaternária no oceano profundo entre os estados do Piauí e Ceará. Fonte: Kowsmann & Costa (1979).

Em Flecheiras, no Estado do Ceará, os eolianitos constituem depósitos holocênicos com menos de 2000 anos cal AP (Castro *et al.*, 2006) e são compostos predominantemente por areias quartzosas, com presença subordinada de bioclastos, cimentadas por calcita (Carvalho *et al.*, 2008). Apresentam rizoconcreções, que os autores mencionados destacam como importantes para o processo de fixação dessas dunas, sem explicitar porém se a fixação se deve às plantas ou à própria cimentação.

No AFN, diferentemente, os eolianitos são quase inteiramente carbonáticos, tendo sido classificados como *grainstones* por Angulo *et al.* (2013), que identificaram duas unidades, quanto à idade mínima de deposição: uma pleistocênica (entre 45411 a 27032 cal AP) e outra holocênica (10673 a 5672 cal AP).

Carvalho *et al.* (2008) propõem que os carbonatos biogênicos presentes nos eolianitos do Ceará tenham-se acumulado em mar raso e, após suposto rebaixamento do NRM, foram expostos na plataforma continental à ação dos ventos, que os transportaram para a zona costeira continental. Deste modo, formaram-se dunas e, parte dos carbonatos teria sido dissolvida pela ação de chuvas, com reprecipitação na forma do cimento que consolidou os seus depósitos.

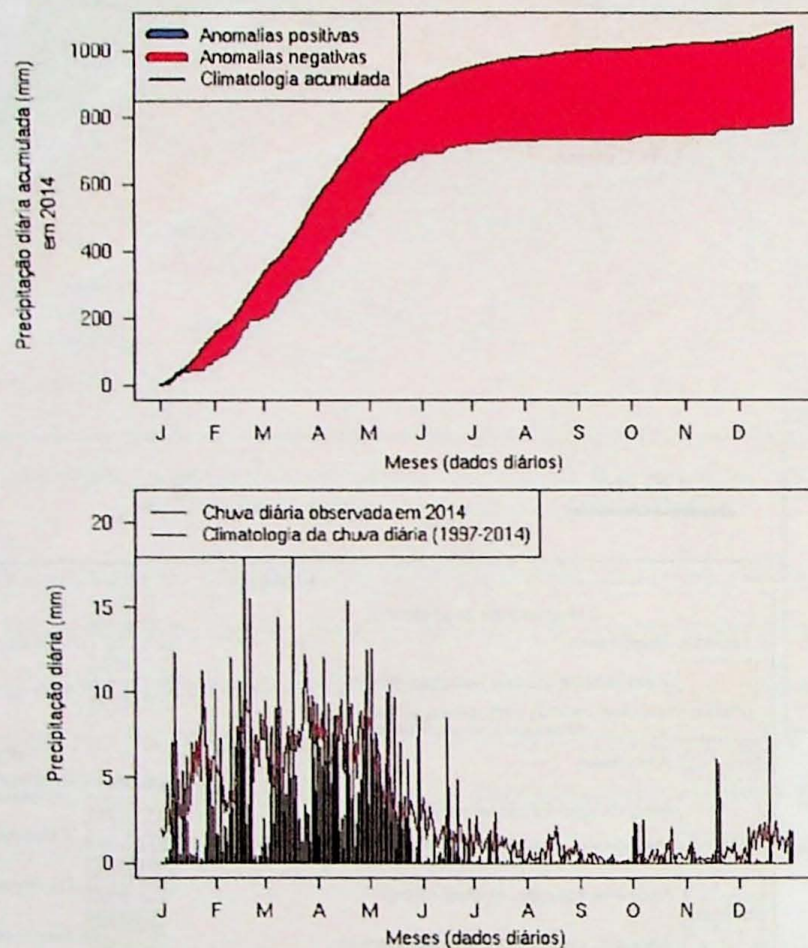


Figura 5. Distribuição de precipitação diária, acumulada (gráfico superior) e simples (diagrama de barras inferior), no ano de 2014, e de precipitação média no período 1997-2014 (curva inferior), na região 33 (costa do Piauí e oeste do Ceará). Médias compiladas de dados do INMET, INPE e Centros Estaduais de Meteorologia. Fonte: CPTEC/INPE.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Trabalho de campo

A atividade de campo realizou-se entre os dias 9 e 17 de dezembro de 2013, no litoral de Luís Correia, Piauí (praias Itaqui, Carnaubinha-Maramar e Macapá), e em vários municípios da região costeira oeste do Ceará (Bitupitá, Camocim, Itarema, Almofala, Trairi e Paracuru). A área total mapeada envolveu 63 afloramentos, cuja análise integrada constitui

o objeto de estudo do mestrado de Valentina Espinel Arias, no qual este TF está inserido. Para o projeto de TF, escolheram-se apenas os campos de dunas entre as praias de Carnaubinha e Maramar, no município de Luís Correia (PI), e de Imboaca e Guajiru, no município de Trairi (CE). Esta escolha baseou-se em critérios de qualidade dos afloramentos quanto a facilidade de obtenção de medidas de paleoventos e diversidade de fácies, incluindo preservação de solos fósseis, marcados por rizoconcreções.

Imagens de satélite do *software Google Earth* foram utilizadas para a localização de afloramentos-alvo, vias de acesso e navegação. A navegação e a localização de afloramentos teve auxílio do aparelho de GPS, cujo erro é de aproximadamente 4 m. O sistema de coordenadas adotado foi o UTM e o referencial geodésico o WGS84. A obtenção de espessuras de séries e atitudes de estratificações cruzadas foi realizada com trenas e bússolas *Clar* e *Brunton*.

Os afloramentos foram nomeados com os códigos EPI ou ECE, conforme situados nos estados do Piauí ou do Ceará, respectivamente, e numerados sequencialmente de W para E. Para as amostras coletadas, foram acrescentadas as letras E, P ou D no final do código de identificação, referente a eolianito (E), praia atual (P) ou duna atual (D). Em alguns casos, adicionou-se mais uma letra especificando o horizonte de amostragem (A, B, e assim por diante, na ordem estratigráfica de baixo para cima).

O trabalho de campo incluiu a descrição de aspectos morfológicos e deposicionais de corpos de eolianito e do sistema praia-duna ativo adjacente, num total de 20 pontos. Exploraram-se os conceitos de fácies morfológicas, segundo proposta sistêmica de Martinho *et al.* (2006) e Giannini (2007) para depósitos eólicos quaternários, e de fácies deposicionais (*sensu* Walker, 1992).

Coletaram-se 13 amostras orientadas de eolianito para sedimentologia, petrografia e datação AMS, e, dentre elas, duas amostras-réplicas para datação LOE. Foram coletadas também cinco amostras de praia e uma de duna frontal ativa, para estudos de proveniência e dispersão sedimentar, e uma amostra de feição eólica (rastro linear residual) não cimentada, para comparação sedimentológica com os eolianitos (Tabela 1).

3.2. Teor de carbonato (ataque ácido)

A dosagem de carbonato por dissolução química foi feita em 18 amostras (Tabela 1). As amostras secas, com massa inicial entre 20 e 30g, foram pesadas e transferidas para um béquer de 500 mL, onde se promoveu a reação com 200mL de HCl 10% em chapa aquecedora a 100°C, por cerca de 20 a 30 minutos. O HCl foi descartado e trocado até não haver mais reação com a amostra, condição identificada pela limpidez da solução e ausência de espuma. Na sequência, filtrou-se e lavou-se a amostra com água destilada, com uso de frasco kitasato conectado à tubulação de vácuo. O material filtrado foi seco em estufa a 60°C por 24h, e, em seguida, pesado novamente.

A partir dos dados de peso inicial e final, calculou-se a porcentagem em massa de carbonato que foi atacado, de acordo com a Equação 1.

$$\text{Teor de carbonato (\% em massa)} = \left[1 - \frac{\text{peso final}}{\text{peso inicial}} \right] \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Para cada valor obtido, estimou-se um erro associado de 5% inerente ao método e devido a perdas de material no descarte do ácido e/ou à reação incompleta com o HCl.

Tabela 1. Relação de amostras coletadas e respectivas análises realizadas.

Código da amostra	Ataque ácido	Granulometria	Petrografia	Datação LOE	Datação AMS
EPI-24E	X	X	X	X	X
EPI-27E	X	X	X		
EPI-28E	X	X	X		
EPI-29E	X	X	X		
EPI-31E	X	X	X	X	X
EPI-32E	X	X	X		
EPI-33E	X	X	X		
EPI-34EA	X	X	X		
EPI-34EB	X	X	X		
EPI-35E	X	X	X		
EPI-37E	X	X	X		
EPI-23P	X	X			
EPI-26P	X	X			
EPI-36P	X	X			
ECE-55E	X	X	X		X
ECE-58E	X	X	X		X
ECE-54P	X	X			
ECE-57P	X	X			

3.3. Ensaio de granulometria

A análise granulométrica foi realizada nas mesmas amostras submetidas ao ataque ácido (Tabela 1). As finalidades do ensaio foram refinar a distinção de fácies ou gerações deposicionais reconhecidas em campo e auxiliar na interpretação de rumos de transporte ou retrabalhamento sedimentar, através do método de McLaren & Bowles (1985), baseado em padrões de variação espacial da granulometria.

O ensaio foi aplicado tanto a amostras *in natura* como nas atacadas por ácido, de modo a avaliar, via comparação de resultados, a influência do material carbonático na distribuição granulométrica. O equipamento utilizado foi o de difração de laser *Malvern Masterizer 2000*, que calcula matematicamente a granulometria das partículas a partir da difração que elas provocam num feixe de raios laser, conforme a teoria de Mie-Fraunhofer. O modelo físico-matemático adotado considera partículas dispersas em movimento aleatório, das quais se infere, portanto, um eixo geométrico médio. O equipamento possui dois tipos de acessório (unidade) de dispersão de amostra: o *Hydro*, para suspensão líquida de amostras lutáceas, e o *Scirocco*, para areia seca.

Empregou-se o acessório *Hydro* como procedimento padrão, pois diversas amostras analisadas apresentavam algum teor de silte e argila (frequentemente maior que 5%), devido à impregnação por material argilo-orgânico ferruginoso ou por micrita de origem

pedogênica. Nas amostras sem ataque ácido, desagregaram-se manualmente torrões secos com auxílio de pistilo de borracha e almofariz, em seguida peneirados na malha de 1 mm. Adicionou-se uma alíquota de cada amostra ao béquer com 900mL de água deionizada e acrescentaram-se cinco gotas de pirofosfato de sódio (dispersante) à solução. Utilizou-se o ultrassom por 5 minutos para garantir a desagregação dos grãos e, em seguida, o equipamento Malvern fez as medidas de granulometria, tratadas e apresentadas através do *software Mastersize 2000*, instalado no processador do equipamento. Para as amostras submetidas a ataque ácido, utilizou-se o ultrassom por apenas 30 s, já que os grãos já se encontravam desagregados por efeito do próprio ataque químico prévio.

3.4. Preparação das seções delgadas

Antes de serem encaminhadas à laminação, as amostras de eolianitos coletadas passaram por processo de impregnação com resina colorida (azul), cuja finalidade é ressaltar a porosidade original dos sedimentos para a etapa seguinte de análise petrográfica.

Foram separados torrões de amostras em tamanho médio 2x2x3 cm, colocados em copos de plástico e levados à estufa por 24h para retirada da umidade antes da impregnação. A impregnação foi iniciada após 15 minutos de repouso da amostra no vácuo e consistiu em gotejamento, numa câmara de vácuo, de uma mistura de 50g de resina epóxi (epoxiglass 1204 – XGY 11), 5g de endurecedor, 7g de solvente (álcool etílico) e 1,5g de corante azul de Orasol sobre o material disposto, de modo que a mistura lentamente permeasse toda a amostra, até encobri-la. A mistura foi gotejada ao lado da amostra, e nunca diretamente sobre ela, para evitar o endurecimento antes da completa penetração nos poros. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas para confecção de seções delgadas em duas réplicas na espessura padrão de 30 µm, uma com lamínula (para análise petrográfica no microscópio óptico) e outra sem (para análise composicional por MEV-EED). No total, confeccionaram-se 28 lâminas, correspondentes a 14 amostras (Tabela 1).

3.5. Análise petrográfica via óptica

No estudo petrográfico, os aspectos descritos englobaram: identificação do arcabouço e do cimento (com o auxílio de atlas petrográficos), aspectos texturais referentes à fração terrígena (granulometria, seleção, arredondamento e esfericidade), caracterização da petrotrama e quantificação global dos constituintes das amostras.

Utilizaram-se as escalas de Wentworth (1922), para classificação nominal da granulometria das areias, e de Folk & Ward (1957) e Pettijohn *et al.* (1973) para a classificação nominal de seleção granulométrica. Para a estimativa visual do arredondamento e da esfericidade dos grãos, adotou-se a tabela gráfica de Powers (1953). Na descrição da petrotrama do arcabouço, atentou-se para empacotamento (avaliado

através da contagem sistemática de contatos intergranulares, conforme método de Kahn (1956), paralelismo e segregação granular.

Com o objetivo de quantificar os minerais e bioclastos presentes nas rochas estudadas, foram feitas contagens modais utilizando-se um procedimento adaptado de Chayes (1956), que propõe uma contagem sistemática de cristais para rochas vulcânicas (número de pontos $n \sim 1000$). As amostras deste estudo, contudo, possuem granulação mais grossa do que aquelas rochas, tornando impraticável a contagem de 1000 pontos em uma única lâmina. As contagens foram feitas em duas amostras de Luís Correia e uma de Trairi, apenas para ilustração e aferição das estimativas modais visuais. A contagem foi realizada ao longo de 10 a 15 perfis longitudinais, com espaçamento regular de 1 mm entre eles, e distância entre pontos de 0,5 mm, cobrindo uma área de 2,5 a 3,75 cm² (1 cm por 2,5 cm ou 1,5 cm por 2,5 cm), equivalente a 50 pontos por perfil. O número total de pontos por lâmina encontra-se nas tabelas anexas.

Estimou-se o percentual de porosidade das amostras de eolianito através da análise de fotomicrografias digitais coloridas adquiridas a partir de câmera digital acoplada ao microscópio petrográfico com a objetiva de menor aumento (2,5x), e que cobriam toda a área da lâmina. As imagens, armazenadas em formato TIF, foram analisadas no *software Leica LAS Image Analysis*, no qual se diferenciou a matiz dos poros (em cor azul). Correções foram feitas para que a imagem discriminada coincidisse exatamente com os poros da amostra. A detecção da porcentagem de *pixels* da imagem discriminada em relação à imagem total corresponde à porcentagem em área de poros da seção.

3.6. Microscopia eletrônica de varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro de energia dispersiva (MEV-EED ou SEM-EDS, em inglês) de duas amostras de eolianito foram realizadas a partir de seções delgadas sem lamínula, previamente impregnadas com resina azul, e recobertas por carbono para análise química dos componentes da amostra. A partir dessas análises, buscou-se refinar a caracterização química do cimento carbonático.

Para esta microanálise, utilizaram-se detectores de elétrons retroespalhados do feixe eletrônico incidente, cuja energia é associada à massa atômica média da superfície da amostra e tem, portanto, significado composicional, e de EED, que permite quantificar a composição química de seções planas num raio de 2 µm ou maior. Nas imagens de elétrons retroespalhados, a diferença de massa atômica dos elementos da região analisada reflete-se na tonalidade de cinza, sendo que tons mais claros correspondem a áreas com elementos de massa atômica mais alta.

Uma medida composicional foi obtida na resina azul ao redor da amostra (composta por C, Si, O, Cl e S), o que permitiu avaliar a sua influência nas porções da amostra com microporosidade preenchida pela resina.

3.7. Datações

O método de datação por luminescência opticamente estimulada (LOE) foi aplicado em grãos de quartzo provenientes de duas amostras de eolianitos do campo de dunas de Carnaubinha-Maramar (Tabela 1). Utilizou-se o protocolo SAR (*Single-Aliquot Regeneration*), conforme Murray & Wintle (2000) e Wintle & Murray (2006).

As datações por ^{14}C via espectrometria de aceleração de massa (AMS) para grãos carbonáticos foram realizadas em duas amostras de Luís Correia e duas de Trairi (Tabela 1). O procedimento consistiu em separar os grãos de algas vermelhas, identificados por microscopia óptica, com auxílio de lupa e pinças, sem contato manual. Para evitar a contaminação por cimento, os bioclastos foram atacados com HCl 5% por cerca de 30 s, lavados com água destilada e secos em estufa a 45°C. As alíquotas assim separadas foram enviadas para o laboratório Poznan Radiocarbon Laboratory da Adam Mickiewicz University, na Polônia, onde se realizaram as datações por AMS. As idades obtidas foram normalizadas para um $\delta^{13}\text{C}$ de - 25 ‰ VPDB e apresentadas em anos calibrados (cal AP) (2σ), com o auxílio do *software* CALIB 6.0 e da curva Intcal09 (Reimer *et al.*, 2009).

3.8. Classificação petrográfica

A classificação dos eolianitos é bastante simplista na literatura. Por exemplo, utilizada a proposta de Fairbridge & Johnson (1978) e Abbeg *et al.* (2001), todos os eolianitos deste estudo classificam-se como eolianitos quartzosos, por conterem <50% CaCO_3 na porcentagem de grãos do arcabouço. Assim, esta classificação é ineficaz na distinção entre tipos de eolianitos, na região.

Dentre as classificações clássicas de rochas sedimentares, houve certa dificuldade em encontrar uma adequada aos eolianitos estudados, já que eles se encontram na interface entre dois mundos distintos da Sedimentologia: o dos arenitos terrígenos e o dos calcários intrabacinais. Optou-se assim por adotar uma classificação híbrida entre as de Dott (1964), para rochas arenáceas terrígenas, e as de Folk (1959, 1962), para depósitos carbonáticos, de modo a contemplar melhor as peculiaridades composicionais encontradas nos eolianitos do Piauí e Ceará.

3.9. Tratamento de dados

Os resultados obtidos de estratificação cruzada, teor de carbonato, granulometria, petrografia óptica e composição do cimento carbonático foram editados e sintetizados em tabelas. Executaram-se balanços de massa (para o teor de carbonato) ou de volume (nos demais), em valores de distribuição percentual.

As medidas de atitudes das estratificações cruzadas dos eolianitos foram tratadas com auxílio do *software* *Stereonet*, no qual se obtiveram histogramas circulares de distribuição dos azimutes, ângulos médios de caimento e seus respectivos desvios padrões.

Os resultados de distribuição granulométrica, agrupados em intervalos de 0,125 ϕ , foram convertidos em medidas estatísticas descritivas (diâmetro médio, desvio padrão, assimetria e curtose), calculados pelo método analítico dos momentos de Pearson. Foram obtidas estatísticas para amostras cimentadas e previamente atacadas por ácido, mas apenas os resultados destas últimas são apresentados, haja vista que o cimento reflete processos diagenéticos e/ou pedogenéticos não vinculados aos processos deposicionais. Testes estatísticos simples, como médias, desvios e correlações lineares (com coordenadas geográfica) foram aplicados aos resultados granulométricos, procurando estabelecer características médias e/ou tendências de variação tempo-espacial de cada agrupamento de amostras.

No estudo de inferência de rumos de transporte sedimentar com base em granulometria, foi usado o método de McLaren & Bowles (1985), em direções determinadas, através de exame de gráficos de variação e respectivos coeficientes de correlação linear, avaliados pelo teste t de Student. O método admite a existência de dois padrões indicadores do rumo de transporte ou de retrabalhamento sedimentar: "mais fino, mais selecionado, mais negativo" (diâmetro médio maior na escala ϕ , menor desvio padrão e assimetria mais negativa) e "mais grosso, mais selecionado, mais positivo" (diâmetro médio menor na escala ϕ , menor desvio padrão e assimetria mais positiva).

Dos resultados obtidos por MEV-EED, a proporção molar $MgCO_3:CaCO_3$ foi obtida através de cálculos estequiométricos simples, de acordo com a Equação 2, onde Y corresponde ao teor de Mg, em % em massa, obtido na análise por MEV-EED, 50 corresponde a proporção molar percentual de $MgCO_3$ na dolomita e 13,18 ao teor em massa percentual teórico de Mg neste mineral. Os valores obtidos foram recalculados para 100%.

$$\% \text{ em mol } MgCO_3 = (50 \cdot Y / 13,18) \quad (\text{Equação 2})$$

Os mapas de fácies das regiões estudadas foram confeccionados a partir do software ArcGis 10.2. O traçado das feições morfológicas baseou-se em análises de imagens de satélite, informações de campo e medidas GPS dos limites dos corpos de eolianito.

4. RESULTADOS

4.1. Fácies morfológicas

Os sistemas eólicos costeiros caracterizados em Luís Correia (PI) e Trairi (CE) são compostos por associações de fácies (feições) morfológicas de praia-duna, planície de deflação e campo de dunas (mapas anexos). Sua extensão atinge cerca de 10 km em Luís Correia e não mais que 7 km em Trairi. Cordões de eolianitos alinhados paralelamente seguem a direção do vento efetivo atual, de NE em Luís Correia e de E em Trairi. São oblíquos à linha de costa, com ângulos em torno de 60° e 40°, respectivamente. Estes cordões (Figuras 6 a 8) situam-se no lençol de areia adjacente à praia e/ou na planície de

deflação. Constituem corpos estreitos (poucos metros de largura), descontínuos e alongados (até centenas de metros de extensão). Em Luís Correia, os eolianitos formam depósitos baixos quando na porção proximal, com decímetros a poucos metros de altura, e são bem mais altos (vários metros) na zona de deflação (Figura 9). Já em Trairi, os eolianitos, encontrados imediatamente após a praia, apresentam mais de 10 m de altura (Figura 8).

A região entre as praias de Carnaubinha e Maramar, Luís Correia, tem orientação da linha de costa N65W (Figura 1). O aporte eólico provém principalmente da praia de Maramar, sob morfodinâmica dissipativa de energia baixa (altura da onda = 0,4 m), constituída de areia predominantemente fina e com presença de seixos e grânulos de bioclastos (e.g. ostras, outros moluscos e bolachas-do-mar) e de ferricretes, estes característicos da fatia estratigráfica superior da Formação Barreiras. Não se encontram dunas frontais adjacentes à praia. No lugar delas, existe um lençol de areia (Figura 10), formado por rupturas de deflação (*blowouts*) baixas (<1m), arrasadas, com mares de *nebkhas* assimétricos ("dunas de sombra"). Mais ao interior, os *nebkhas* passam gradualmente à zona de deflação (Figura 11) caracterizada por superfícies vegetadas, rastros lineares residuais ativos, retrocordões e montes residuais dispersos, estes mais densamente vegetados e com até 2,5m de altura. Na parte mais distal do sistema eólico, as fácies de deflação dão lugar ao campo de dunas com cadeias barcanoides (Figura 12), cordões de precipitação e depressões interdunas, reconhecíveis em imagem de satélite (Figura 1).

A região de Trairi tem orientação da linha de costa entre N35W e N50W. O aporte eólico provém das praias de Imboaca, situada a NW, e Guajiru, a SE.

Em Imboaca, a praia apresenta morfodinâmica intermediária dissipativa (estágio 2 na classificação de Wright *et al.* 1979) de energia baixa (altura da onda ~ 0,5 m), com areias de granulação predominantemente média e com uma possível linha de recifes na zona submersa. Possui berma bastante definida, de largura ampla (>50m), e cúspides suaves com desnível menor que 20 cm e espaçamento de várias dezenas de metros. Ao interior da berma, seguem-se: canaleta úmida, conectada a drenagem, duna incipiente irregular, canaleta inundada e duna frontal estabelecida em rampa (Figura 13).

A praia de Guajiru, sob morfodinâmica intermediária dissipativa de alta energia (altura da onda ~ 1 m), é constituída por areias de granulação predominantemente média. A praia é estreita (largura <10m), e sua extensão é sinuosa, devido à presença de cúspides sucessivas espaçadas de cerca de 50 m, com desnível entre calha e crista menor que 0,4 m. Ao interior das cristas das cúspides, configuram-se bermas, com caimento suave, e a sotavento, encontra-se rampa de pé de duna frontal incipiente, que passa gradualmente ao interior para dunas frontais estabelecidas (Figura 14). Rupturas de deflação aparecem superimpostas à areia que circunda os cordões de eolianitos.

No sentido sotavento, em ambas as praias, a planície de deflação é curta (cerca de 2 a 3 km de extensão) e caracteriza-se como uma superfície aproximadamente plana, vegetada, com rastros lineares, dunas parabólicas e retrocordões. Mais adiante, no rumo do vento, as fácies de deflação desaparecem e dão lugar ao campo de dunas, formado por cadeias barcanoides e depressões interdunas.



Figura 6. Cordão de eolianito em Maramar, Luís Correia, próximo ao afloramento EPI-32.



Figura 7. Cordões de eolianitos adjacentes à praia de Imboaca, Trairi (ECE-58).



Figura 8. Cordão de eolianito em Guajiru, Traini. Próximo ao afloramento EPI-56.



Figura 9. Cordões de eolianitos em Maramar, próximo ao afloramento EPI-29. Notar contraste entre os cordões baixos, submétricos a métricos, situados em meio ao lençol de areia da porção proximal do sistema eólico costeiro (em primeiro plano na foto) e os mais altos, decamétricos, na zona de deflação (montes visíveis no fundo da foto).



Figura 10. Praia de Maramar (PI), ao fundo, ladeada por lençol de areia extenso, formado por rupturas de deflação arrasadas e mares de *nebkhas* assimétricos ("dunas de sombra"). Próximo ao afloramento EPI-26.



Figura 11. Rastros lineares e cordões de eolianitos em meio à extensa planície de deflação vegetada. A praia de Maramar está orientada à esquerda da foto. Próximo ao afloramento EPI-25E.



Figura 12. Campo de dunas barcanoides em Luís Correia.



Figura 13. Configuração morfológica em Imboaca, Trairi. Notar contraste de vegetação entre duna incipiente irregular (DFI) e duna frontal estabelecida em rampa (DFE). Afloramento ECE-54.



Figura 14. Configuração morfológica em Guajiru, Trairi. Os eolianitos situam-se após dunas frontais estabelecidas (DFE), em meio à *blowouts* e esparsos *nebkhas*. Afloramento ECE-57.

4.2. Fácies deposicionais

Cordões de eolianitos próximos entre si apresentam com frequência estratificações cruzadas com rumos de caimento opostos. Estendem-se por centenas de metros (~500 m) de forma descontínua e formam crostas cimentadas, concentradas na parte superior dos cordões, com espessura de decímetros a poucos metros.

Em Maramar, identificaram-se três fácies deposicionais de mesma granulometria (arenitos bioclásticos de areia fina a média) (Figura 15). Na ordem de empilhamento estratigráfico mais comum, correspondem a arenito com estratificação cruzada de ângulo alto, com rizoconcreções escassas a ausentes (AFMca), arenito com cruzada de ângulo baixo, com rizoconcreções escassas a ausentes (AFMcb), e arenito com cruzada de ângulo baixo, com rizoconcreções abundantes (AFMcbr).

Em Trairi (CE), caracterizaram-se somente duas fácies (Figura 17), ambas constituídas de arenitos bioclásticos de areia média a grossa. Na ordem de empilhamento estratigráfico mais comum, correspondem a arenito com estratificação cruzada de ângulo alto (AMGca) e arenito com cruzada de ângulo baixo (AMGcb), ambos com rizoconcreções escassas a ausentes. Um resumo das fácies é apresentado na Tabela 2.

Os azimutes de estratificações cruzadas dos eolianitos em Maramar e Trairi (Figura 16) apresentam padrão bimodal, com moda principal SSE em ambas as regiões e moda secundária NW e NE, em Luís Correia e Trairi, respectivamente. As modas são transversais à orientação dos cordões e rastros lineares, ENE em Luís Correia e WNW em Trairi. Nota-se

mudança sutil na orientação dos cordões de W (Piauí) para E (Ceará), acompanhadas por mudança correspondente na direção das duas modas.

Tabela 2. Síntese das fácies deposicionais dos eolianitos em estudo.

Fácies deposicional		Fácies morfológica atual associada	Composição	Espessura da fácies (m)	Ângulo dominante de mergulho das estratificações cruzadas (°)	Rizoconcreções	Altura máxima do cordão (m)
Luís Correia	AFMc _{br}	Planície de deflação	Arenitos bioclásticos de areia fina a média	1 a 2,5	Baixo (≤10)	Abundantes	>5
	AFMc _b			0,5 a 2	Baixo (≤10)	Escassas a ausentes	<5
	AFMc _a			0,4 a 2	Alto (>10)		<1 ou >5
Trairi	AMGc _b	Planície de deflação e praia-duna	Arenitos bioclásticos de areia média a grossa	<6	Baixo (≤10)	Escassas a ausentes	~15
	AMGc _a			<2	Alto (>10)		~15

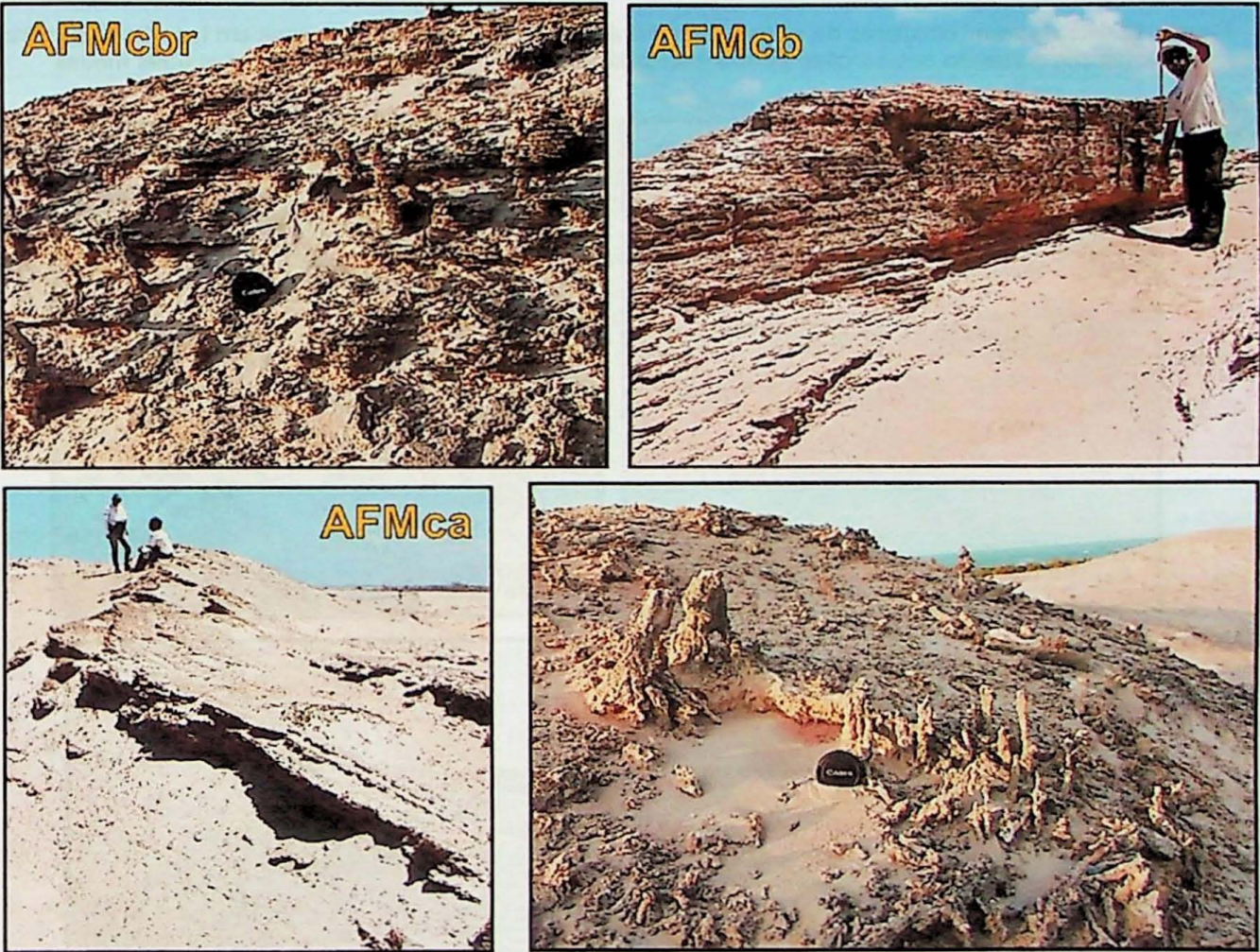


Figura 15. Fácies deposicionais identificadas em Maramar, Luís Correia, todas constituídas por arenitos bioclásticos de areia fina a média: com estratificação cruzada de ângulo baixo e rizoconcreções abundantes (AFMc_{br} - afloramento EPI-25); com estratificação cruzada de ângulo baixo e rizoconcreções escassas a ausentes (AFMc_b - EPI-31); e com estratificação cruzada de ângulo alto e rizoconcreções escassas a ausentes (AFMc_a - EPI-32). Notar detalhe das rizoconcreções da fácies AFMc_{br} em destaque (foto inferior esquerda).

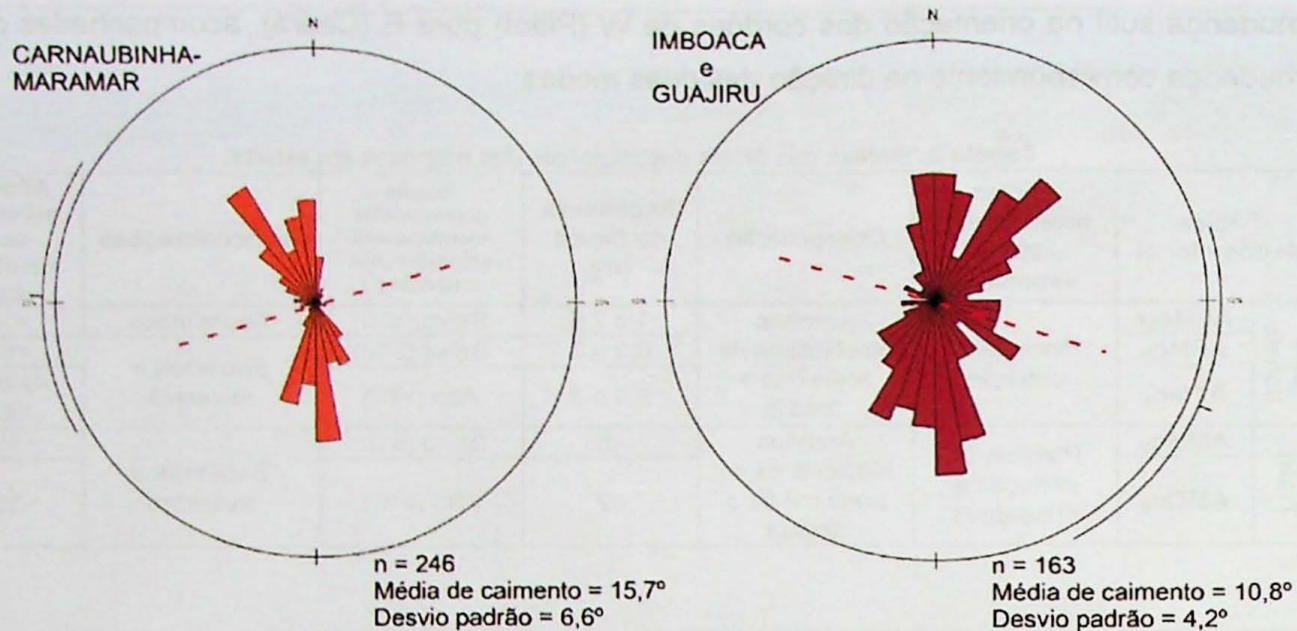


Figura 16. Histogramas circulares de azimutes de estratificação cruzada dos eolianitos em Luís Correia e Traini. Notar que a direção dos cordões (linhas tracejadas em vermelho) está na bissetriz das duas modas.

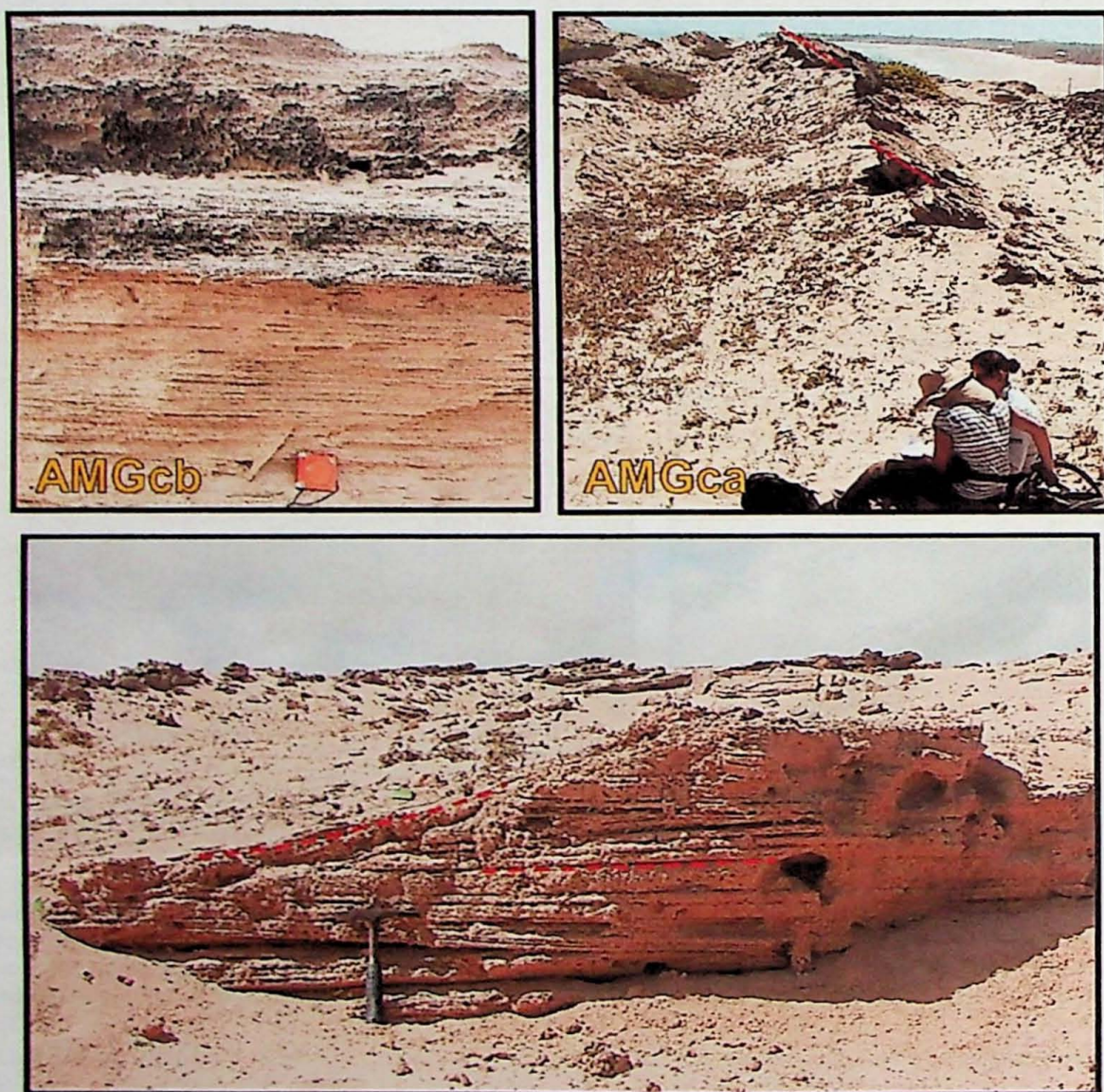


Figura 17. Fácies deposicionais identificadas em Traini, ambas constituídas por arenitos bioclásticos de areia média a grossa com rizoconcreções escassas a ausentes. **AMGcb** - arenito com cruzada de ângulo baixo (afloramento ECE-55); **AMGca** - arenito com cruzada de ângulo alto (ECE-58). Notar truncamento de cruzadas de ângulos diferentes (foto inferior).

4.3. Datações

Os cordões de eolianitos de Luís Correia e Trairi são do Holoceno superior, com menos de 4000 anos, conforme idades LOE (Tabela 3) e ^{14}C AMS (Tabela 4).

As idades LOE e AMS são parecidas para a amostra EPI-24E, com sobreposição dentro das margens de erro. Porém, para a amostra EPI-31E e, estatisticamente, para todo o conjunto de dezenas de amostras datadas por Arias (2015) no Piauí e Ceará, as idades AMS são até poucos séculos mais antigas que as idades LOE (Arias, 2015), como esperado.

A amostra EPI-24E proveniente de afloramento de eolianito mais distante da linha de costa, mais alto e mais abundante em rizoconcreções do que a amostra EPI-31E (Figura 1), é mais antiga do que ela. Contudo, estatisticamente, os eolianitos mais próximos da praia são mais antigos que os mais distantes (Arias, 2015).

Tabela 3. Idades LOE das amostras de Luís Correia, referentes a anos antes de 2014.

Área	Amostra	Fácies deposicionais	Fácies morfológica associada	Idade LOE (anos)	Erro (anos)	Taxa de dose (Gy)	Erro taxa de dose	Profundidade de coleta (cm)
Luís Correia (PI)	EPI-24E	AFMc _{br}	Planície de deflação	2984	271	3,28	0,127	20
	EPI-31E	AFMc _b	Planície de deflação (lençol de areia)	1226	133	0,68	0,057	60

Tabela 4. Idades ^{14}C AMS das amostras de eolianitos estudadas. Os valores A.P referem-se a anos antes de 1950.

Área	Amostra	Fácies deposicionais	Fácies morfológica associada	Idade ^{14}C (anos cal A.P)	Tipo de material datado
Luís Correia (PI)	EPI-24E	AFMc _{br}	Planície de deflação	3056-3209	Molusco e algas
	EPI-31E	AFMc _b	Praia-duna (lençol de areia)	2180-2240	Algas
Trairi (CE)	ECE-55E	AMGc _b	Praia-duna	1240-1304	Algas
	ECE-58E	AMGc _b	Praia-duna	2113-2309	Algas e moluscos

4.4. Teor de carbonato

Os resultados de teor em massa de carbonato nos eolianitos e nas praias adjacentes são apresentados na Tabela 5. Os teores são mais altos em Luís Correia do que em Trairi e os eolianitos, no geral, alcançam valores mais elevados (até cerca de 15 pontos percentuais) do que as areias de praia. As concentrações de carbonato encontradas, tanto na praia quanto nos eolianitos, são, contudo, muito inferiores às da plataforma continental adjacente (mais de 50% segundo Kowsmann & Costa, 1979).

Tabela 5. Teor de carbonato (% em massa) de amostras de eolianitos e areias de praia.

Área	Teor de carbonato (% em massa)	
	Eolianitos	Sedimentos praias
Carnaubinha-Maramar - Luís Correia (PI)	7 a 28	14 a 18
Imboaca e Guajiru - Trairi (CE)	15 a 20	4 a 9

As amostras de eolianito de Maramar apresentam tendências lineares de diminuição do teor de carbonato com o aumento da distância à costa (Figura 18). A linha de tendência em verde (Fig. 18), particularmente, corresponde a um grupo distinto de amostras alinhadas geograficamente (EPI-33E a EPI-35E). Não é possível afirmar sobre tendências lineares de variação nos eolianitos de Trairi devido à escassez de dados (apenas duas amostras), mas o eolianito de Guajiru, mais afastado da costa, é também mais pobre em carbonato que o de Imboaca, mais proximal, o que permite suspeitar que se trate do mesmo padrão de variação identificado no Piauí.

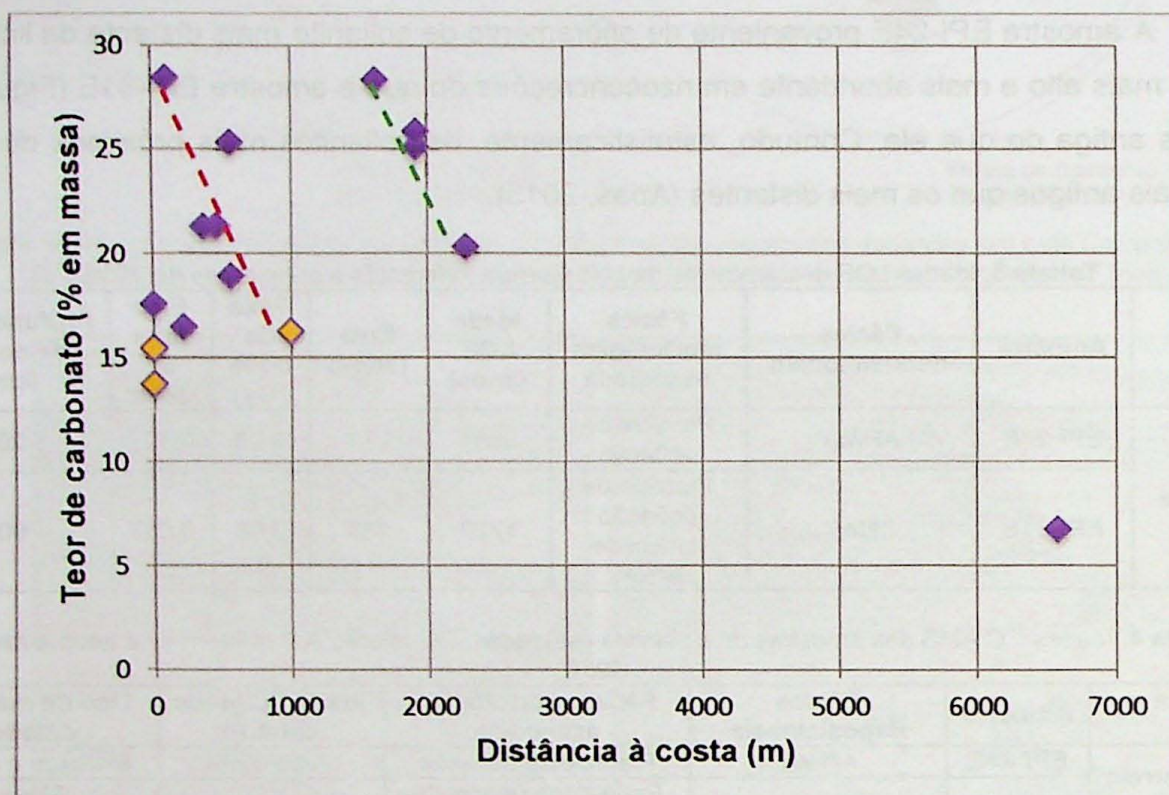


Figura 18. Variação do teor de carbonato em função da distância à costa. Sedimentos praias em amarelo e laranja. Eolianitos de Luís Correia em roxo e de Trairi, em vermelho. I corresponde ao setor Imboaca e G, a Guajiru. Linha de tendência em vermelho: $r = -0,818$ e $p = 0,005$; linha de tendência em verde: $r = -0,987$ e $p = 0,0004$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.

4.5. Granulometria

A análise granulométrica por difração de laser mostra que o diâmetro médio das amostras de eolianitos varia de areia média a areia fina em Luís Correia (Figura 19) e de areia média a areia grossa em Trairi (Figura 20). As amostras de praia têm granulometria mais fina do que os eolianitos em ambas as áreas.

Em Maramar, duas tendências lineares de afinamento para dentro do continente estão muito bem demarcadas (Figura 19), sendo que a linha de tendência em verde, particularmente, correspondente a um grupo distinto de amostras alinhadas geograficamente (EPI-33E a EPI-35E). Em Trairi, não é possível avaliar estas tendências devido à escassez de dados.

A seleção granulométrica foi avaliada a partir do desvio padrão em ϕ das amostras (Figura 21), o qual indicou seleção boa (valor limítrofe) a moderada para as amostras de eolianitos, com maior grau de seleção, em geral, em Luís Correia do que em Trairi. Dentre

as amostras de eolianito de Luís Correia, identifica-se tendência linear grosseira ($r = 0,621$; $p = 1,1\%$) de melhora de seleção com o aumento da distância à costa.

As curvas de distribuição granulométrica apresentam padrão unimodal e a assimetria varia de negativa, em areias de praia, para positiva em areias de eolianitos (Figura 22). Assimetria negativa indica que a distribuição possui cauda prolongada do lado das frações grossas e moda mais fina que a mediana, enquanto assimetria positiva indica o oposto. Dentre as amostras de eolianito de Luís Correia, notam-se duas linhas de tendência de queda do valor absoluto da assimetria com o aumento da distância à costa.

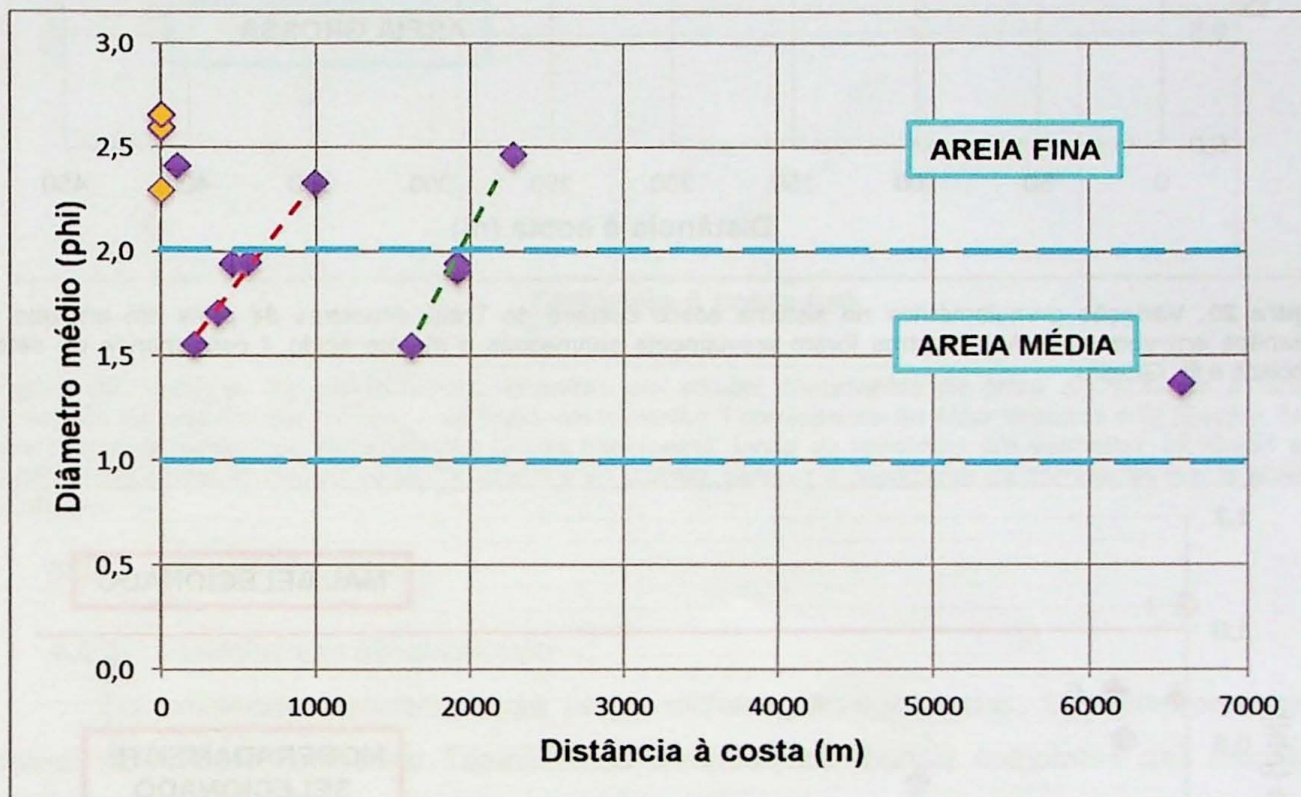


Figura 19. Variação granulométrica no sistema eólico costeiro de Maramar, Luís Correia. Amostras de praia em amarelo, demais pontos, eolianitos. As amostras foram previamente submetidas a ataque ácido. Notar tendências de afinamento (linhas tracejadas). Linha de tendência em vermelho: $r = 0,975$ e $p = 0,008$; linha de tendência em verde: $r = 0,998$ e $p = 0,0004$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.

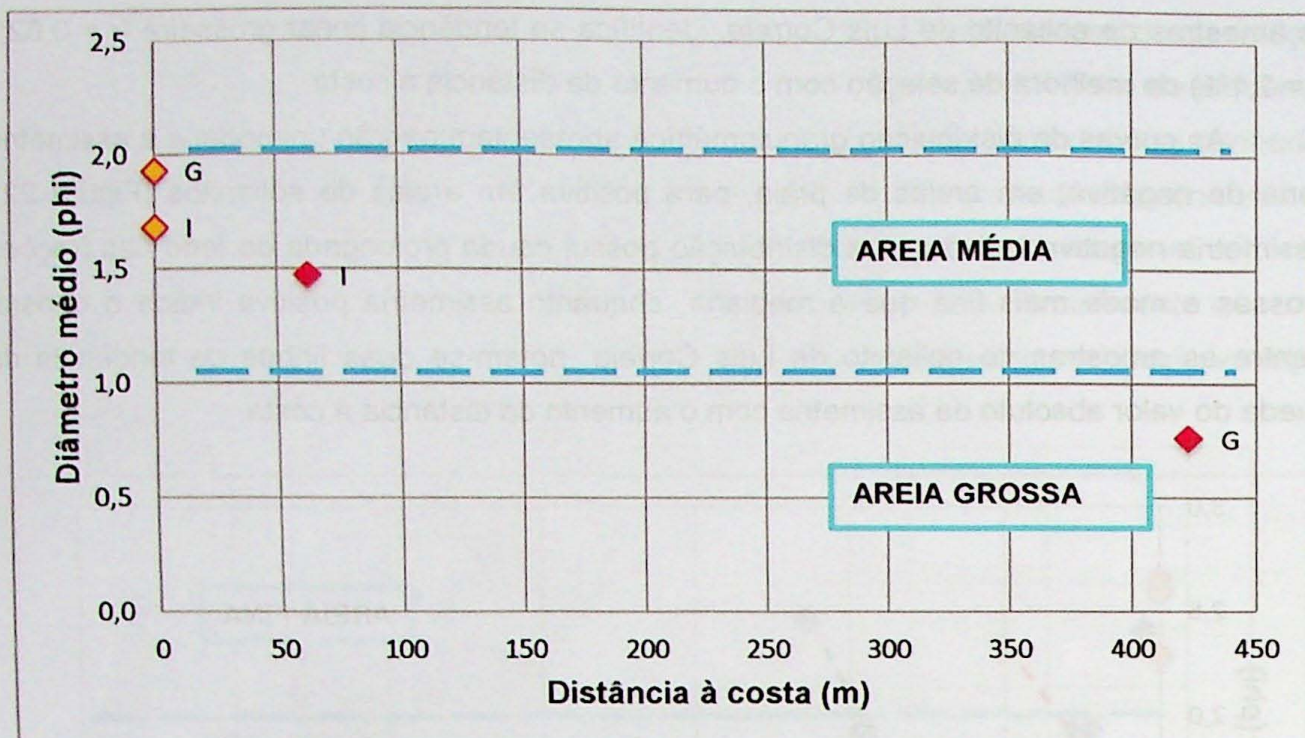


Figura 20. Variação granulométrica no sistema eólico costeiro de Trairi. Amostras de praia em amarelo e eolianitos em vermelho. As amostras foram previamente submetidas a ataque ácido. I corresponde ao setor Imboaca e G, Guajiru.

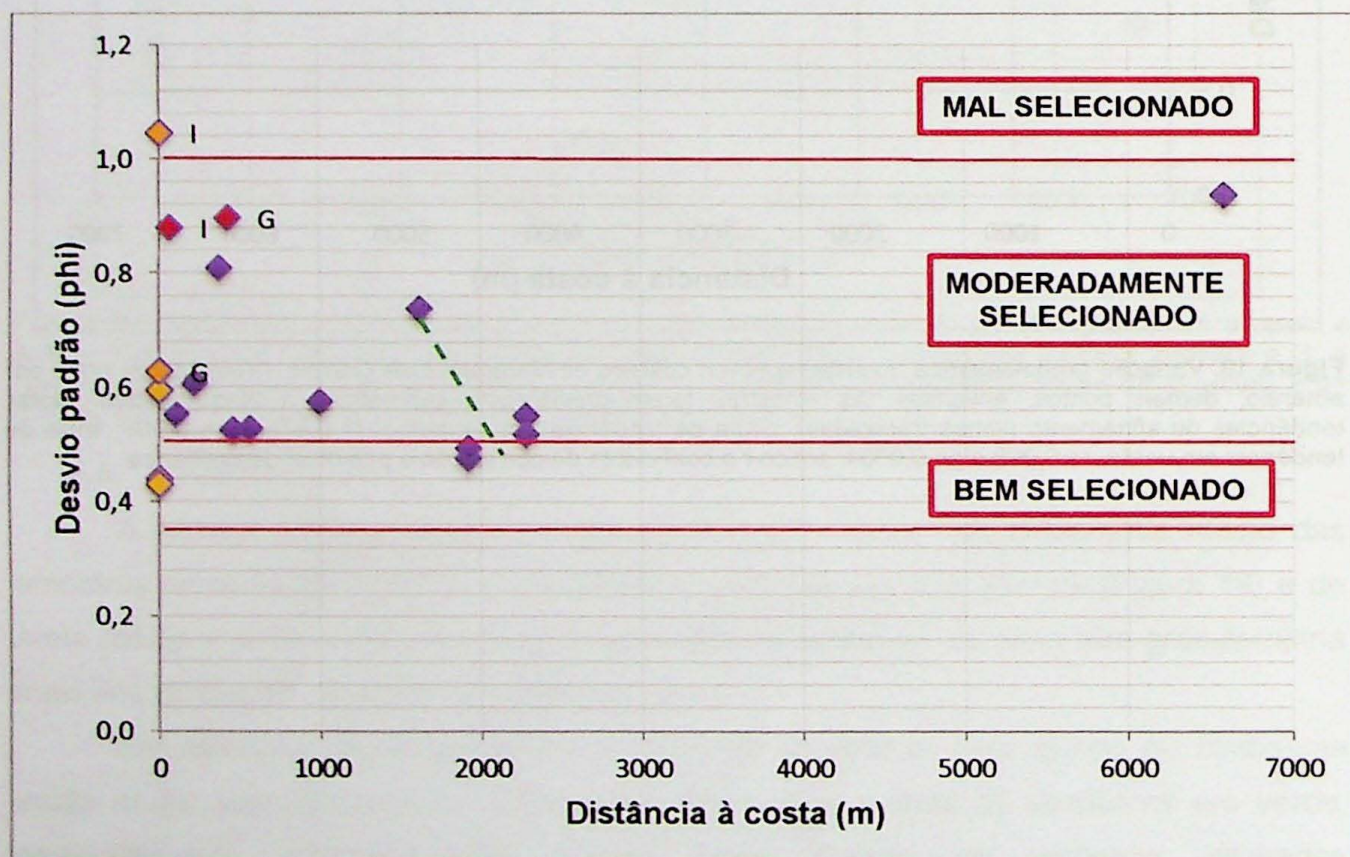


Figura 21. Desvio padrão do diâmetro médio das amostras em estudo. Sedimentos de praia em amarelo e laranja. Eolianitos de Luís Correia em roxo e de Trairi, em vermelho. I - Imboaca e G - Guajiru. Linha de regressão linear em verde, para todo o conjunto de amostras de eolianito: $r = -0,589$ e $p = 0,0000$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.

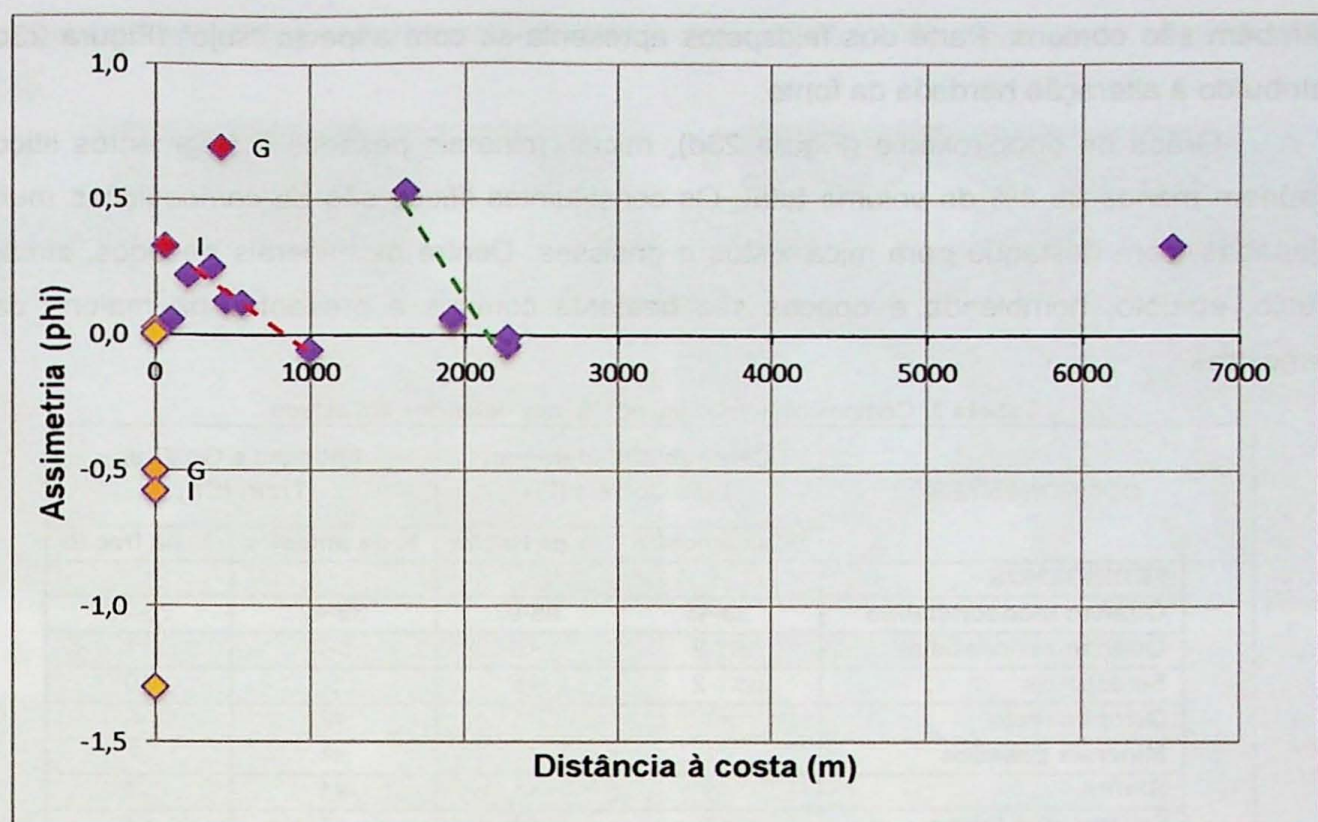


Figura 22. Variação da assimetria das amostras em estudo. Sedimentos de praia em amarelo e laranja. Eolianitos de Luís Correia em roxo e de Trairi, em vermelho. I corresponde ao setor Imboaca e G, Guajiru. Notar tendências de diminuição da assimetria (linhas tracejadas). Linha de tendência em vermelho: $r = -0,954$ e $p = 0,008$; linha de tendência em verde: $r = -0,871$ e $p = 0,0000$, sendo r o coeficiente de correlação e p , o nível de confiança.

4.6. Petrografia óptica

4.6.1. Constituintes do arcabouço

Os eolianitos caracterizam-se como rochas grão-suportadas, bastante porosas e pouco cimentadas, conforme Tabela 6. As composições modais completas das amostras estudadas encontram-se compiladas na Tabela 7.

Tabela 6. Estimativa modal de componentes dos eolianitos em estudo.

Componentes	Região	
	Carnaubinha-Maramar (Luís Correia, PI)	Imboaca e Guajiru (Trairi, CE)
Arcabouço	50-68%	60-70%
Matriz	0%	0%
Cimento	7-15%	5-7%
Poros	22-38%	23-28%
Total	100%	100%

O arcabouço é composto por grãos terrígenos, bioclásticos e intralitolásticos. Entre os terrígenos presentes, o quartzo monocristalino (Figura 23a) é o constituinte mais abundante, principalmente em Luís Correia, onde contabiliza mais de 95% da fração (Tabela 7). Nas amostras de Trairi, em contraste, o arcabouço apresenta assembleia mineralógica mais variada.

Quartzo policristalino, encontrado principalmente nas amostras de Trairi, é constituído por cristais aproximadamente poligonais (Figura 23b), em mosaico, de provável origem metamórfica. Feldspatos, de diferentes variedades (plagioclásio e microclínio)

também são comuns. Parte dos feldspatos apresenta-se com aspecto "sujo" (Figura 23c), atribuído à alteração herdada da fonte.

Grãos de ortopiroxênio (Figura 23d), micas, minerais pesados e fragmentos líticos reúnem menos de 3% do volume total. Os constituintes líticos são de composições muito variadas, com destaque para mica xistos e gnaisses. Dentre os minerais pesados, zircão, rutilo, epídoto, hornblenda e opacos são bastante comuns e presentes na maioria das amostras.

Tabela 7. Composições modais, em %, dos eolianitos em estudo.

COMPONENTES		Carnaubinha-Maramar, Luís Correia (PI)		Imboaca e Guajiru, Trairi (CE)	
		% na amostra	% na fração	% na amostra	% na fração
ARCABOUÇO	TERRIGENOS				
	Quartzo monocristalino	33-45	95-97	35-42	70-75
	Quartzo policristalino	≤1-2	<5	5-7	11
	Feldspatos	≤1-2	<5	5	10
	Ortopiroxênio	<1	<1	<2	4
	Minerais pesados	<1	≤1	≤1	2
	Biotita	<1	<1	<1	<1
	Fragmentos líticos	<1	<1	<1	<1
	Total	35-50	100	50-58	100
	BIOCLASTOS				
	Alga coralínea	5-30	85-95	3-5	30-35
	Bivalve	1-3	5-10	≤1	10-15
	Coral	<1	<2	1-2	20-25
	Foraminíferos bentônicos	<2	<2	≤1	10
	Craca	<1	<1	<1	2
	Gastrópodo	<1	<1	<1	2
	Equinoide	<1	<1	<1	4
	Não identificados	<1	<5	<1	7
	Total	6-35	100	7-10	100
	INTRACLASTOS	≤1		1	
	POROS	22-38		23-28	
	CIMENTO CARBONÁTICO	7-15		5-7	
	Total	100		100	

Quanto aos bioclastos, as algas vermelhas coralíneas (Fig. 24a) são as mais abundantes nos eolianitos de Luís Correia. Em menor quantidade, estão presentes bivalves (Fig. 24b), corais, foraminíferos bentônicos (predomínio de miliolídeos) (Fig. 24c e d), equinoides, na forma de espinhos (Fig. 24e), e cracas (Fig. 24f). Em Trairi, a quantidade de bioclastos é menor e não existe um tipo francamente dominante, com prevalência, em concentrações equilibradas, de algas coralíneas, corais (Fig. 24g) e bivalves, e presença, em quantidades subordinadas, de foraminíferos bentônicos (sobretudo miliolídeos), gastrópodos (Fig. 24h), equinodermas e cracas, entre outros.

Intralitoclastos aparecem dispersos entre os grãos do arcabouço. Os argilo-orgânico-ferruginosos (Fig. 24i) apresentam formato esferoide e são compostos por massa coloidal semi-opaca, de cor marrom a avermelhada escura à luz convergente, geralmente contendo grãos siltosos de quartzo e foraminíferos. Em algumas amostras, há também intralitoclastos

compostos somente por carbonato micrítico a microespático, descritos como peloides (Fig. 24j).

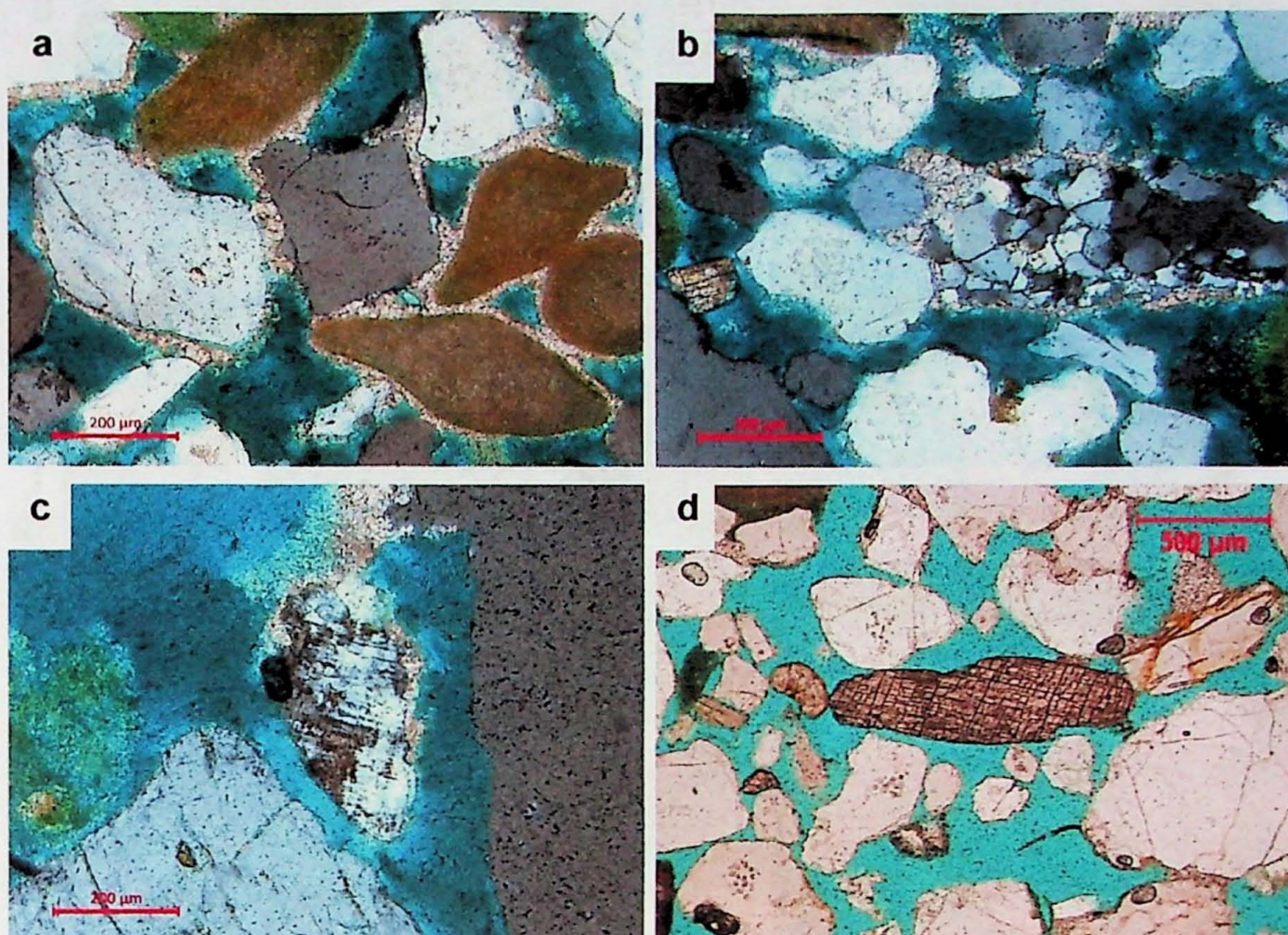


Figura 23. Alguns aspectos do arcabouço terrígeno dos eolianitos em estudo: **a.** grãos subangulosos de quartzo, associados a bioclastos arredondados de algas vermelhas (amostra EPI-33E); **b.** grão de areia grossa de quartzo policristalino, com arranjo interno em mosaico (EPI-33E); **c.** microclínio com aspecto "sujo", indício de dissolução prévia (ECE-55E); **d.** corte basal de grão de piroxênio (ECE-55E). Fotomicrografias **a**, **b** e **c** a nicóis cruzados e **d** a nicóis paralelos.

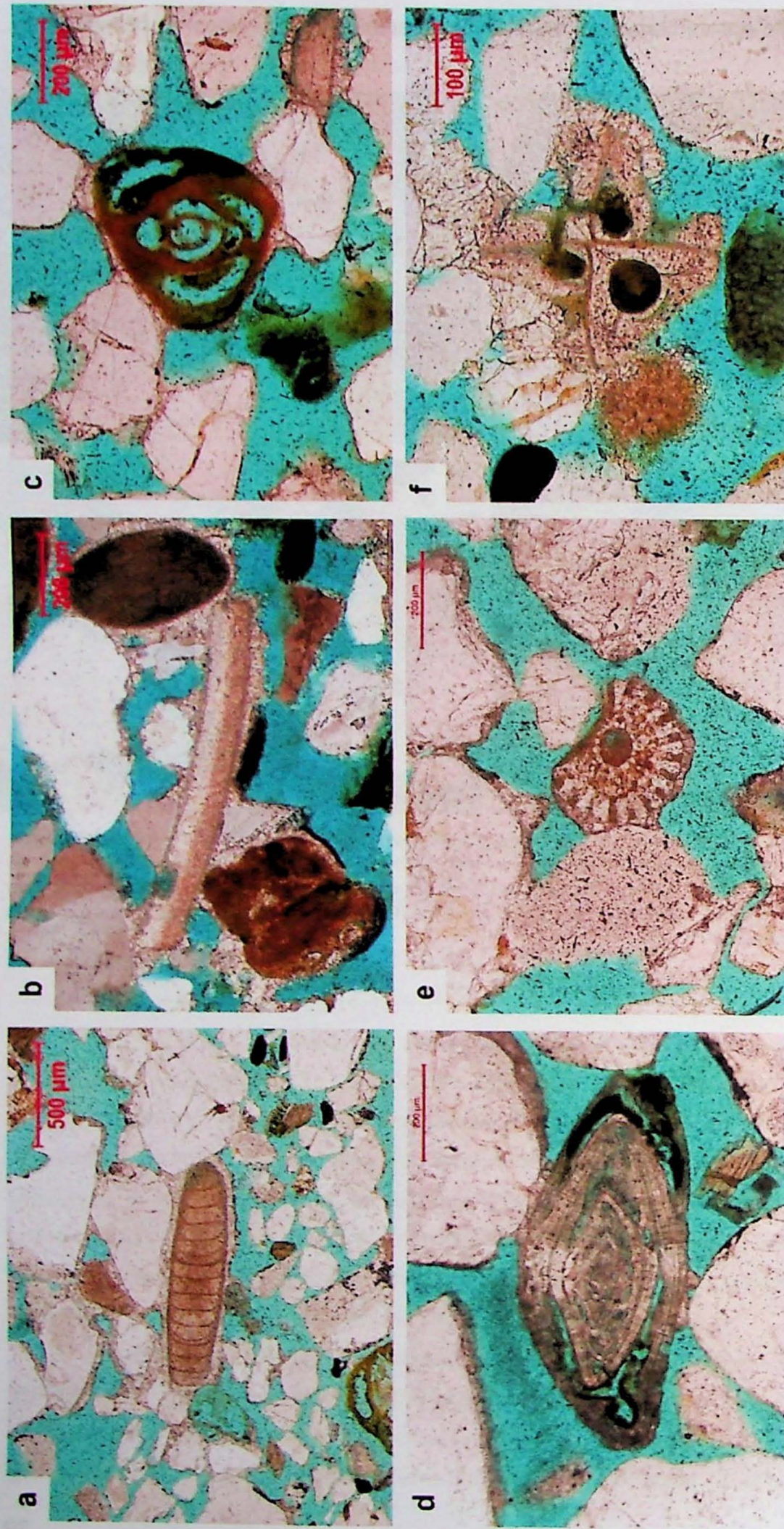


Figura 24. Bioclastos presentes nos eolianitos: **a.** alga vermelha coralínea (amostra ECE-58E); **b.** bivalve, com dupla face calcita-aragonita (EPI-33E); **c.** testa micrítica de foraminífero bentônico miliolídeo (EPI-32E); **d.** foraminífero bentônico fusulinídeo (ECE-58E); **e.** espinho de equinoídeo, em seção basal (ECE-58E); **f.** craca ou coral (EPI-33E). Fotomicrografias a nicóis paralelos. Continua...

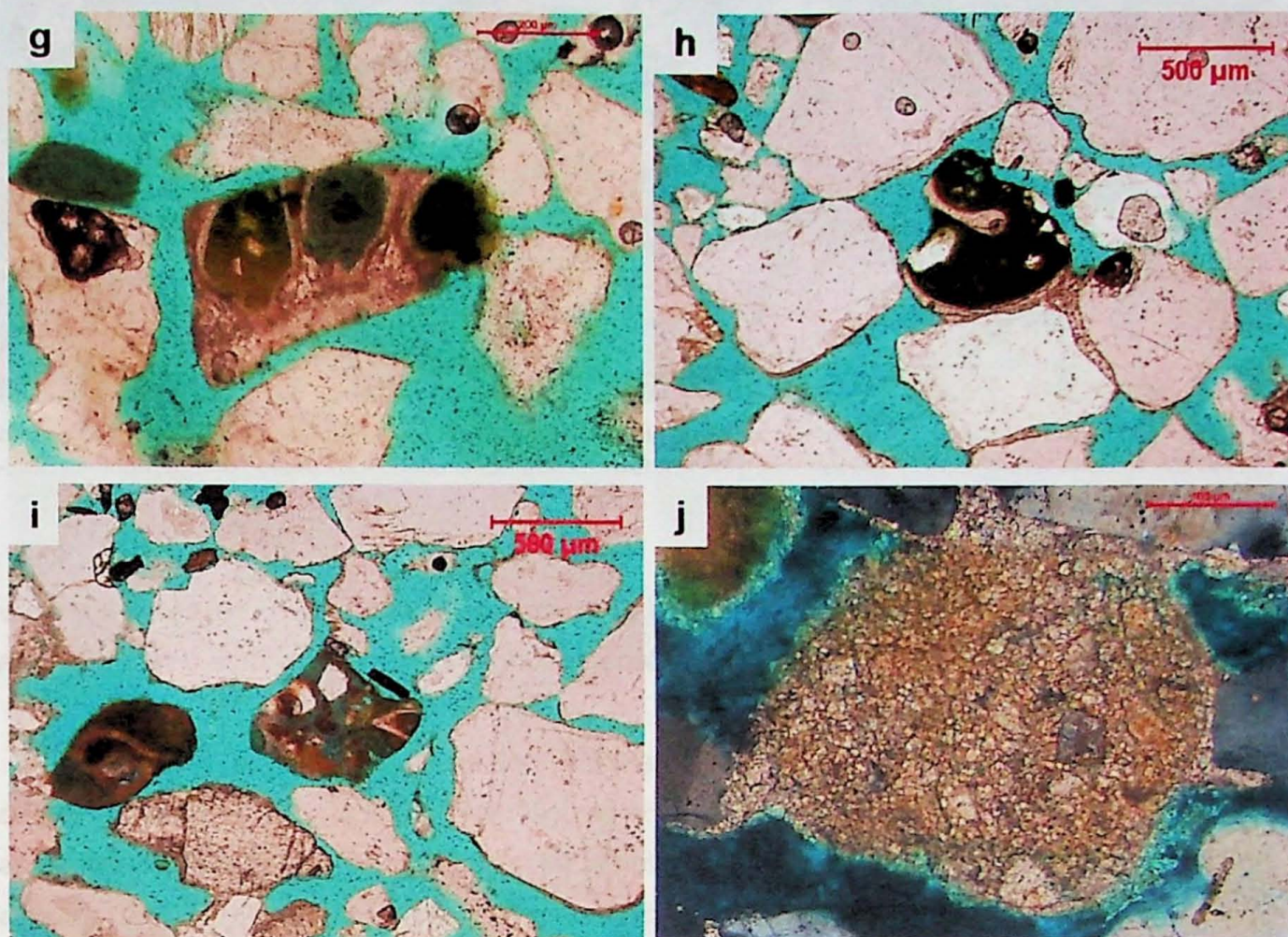


Figura 24. Continuação: **g.** coral ou craca (ECE-55E); **h.** gastrópode, com preenchimento por grãos siltosos e cimento criptocristalino argilo-orgânico-ferruginoso (ECE-55E); **i.** intraclasto argilo-orgânico-ferruginoso (ECE-55E); **j.** pelóide de carbonato microespático (EPI-28E). Fotomicrografia **j** a nicóis cruzados, demais a nicóis paralelos.

4.6.2. Trama e textura do arcabouço

O empacotamento do arcabouço é aberto com distribuição heterogênea, marcada pela presença de aglomerações milimétricas de grãos mais próximos. O índice de empacotamento IPKp de Kahn (1956) varia entre 0 e 10%, com larga predominância de contatos flutuantes e quase inexistência de contatos intergranulares.

Os grãos terrígenos aparecem na maioria dos casos sem orientação aparente (devido à alta esfericidade), mas o paralelismo entre os bioclastos alongados (possivelmente segundo a estratificação) (Fig. 25a) é frequentemente perceptível. Observa-se também segregação granular quanto a tamanho (concentração alternada de grãos mais finos e mais grossos), ao longo de linhas com boa seleção granulométrica que acompanham a estratificação (Fig. 25b), típicas da deposição pelo vento (laminação risca de agulha *sensu* Fryberger & Schenk, 1988).

A granulometria e seleção das areias de eolianitos já foram apresentadas no item 4.5. Os grãos de quartzo são subangulares a subarredondados (0,3 a 0,4 na escala gráfica utilizada) e apresentam esfericidade predominantemente alta a média.

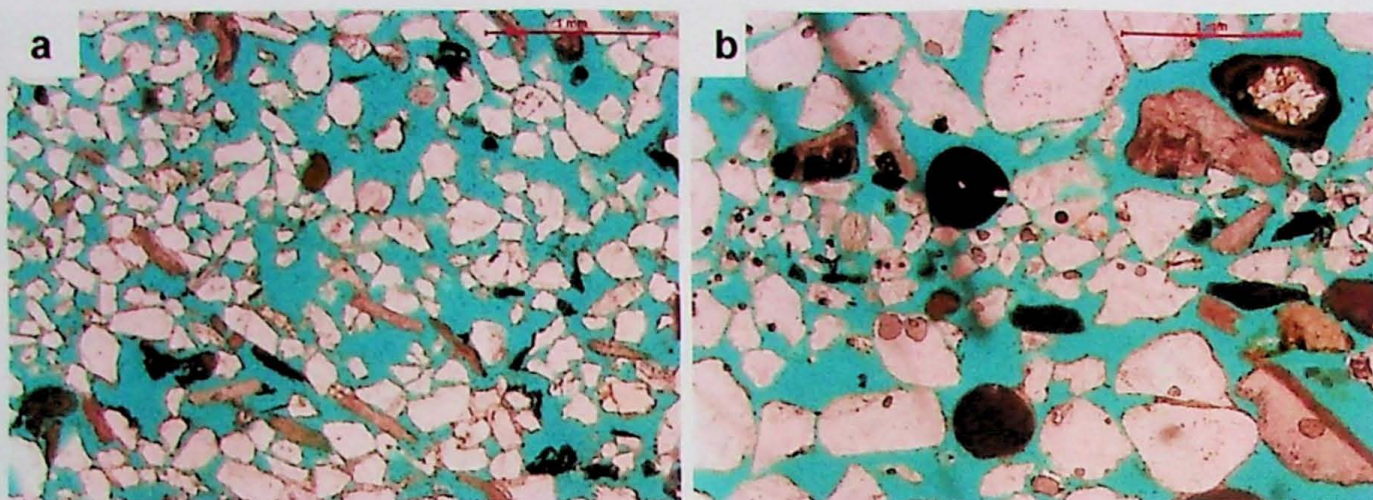


Figura 25. Feições texturais: **a.** paralelismo entre grãos, mais perceptível entre bioclastos alongados, como bivalves (amostra EPI-34EB); **b.** grãos mais finos em faixa central, delineando laminação risca de agulha (ECE-55E). Fotomicrografias a nicóis paralelos.

4.6.3. Cimento e poros

Os eolianitos estudados apresentam porosidades elevadas, sempre acima de 20% (Tabela 6). Há feições sugestivas de porosidade secundária, como a móldica (Fig. 26a) e de grãos parcialmente corroídos.

As amostras de Trairi são menos cimentadas que as de Luís Correia.

O cimento é essencialmente de composição carbonática. Aparece como calcita microespática a espática concentrado em torno de aglomerações de grãos próximos, às vezes com orientação subvertical, e forma franjas envoltentes anisópacas (Fig. 26c), muitas vezes com padrão pendular (Fig. 26d) e em menisco (Fig. 26e), ou preenchimento intersticial com arranjo drusiforme (Fig. 26f).

Não há indícios de outros tipos de cimentos, exceto por uma película preta, aparentemente de material criptocristalino opaco, recobrindo a superfície superior de poucos grãos de quartzo (Fig. 26h).

4.6.4. Classificação petrográfica

Tomando como referência a fração terrígena, os eolianitos de Luís Correia classificam-se petrograficamente como quartzo arenitos, enquanto os de Trairi correspondem a arenitos líticos (Dott, 1964; Folk, 1968) ou sublitoarenitos (Folk, 1968), o que evidencia leve diferença entre as composições nas duas regiões estudadas. Já com relação à fração carbonática, os eolianitos de ambas as regiões caracterizam-se como calciarenitos biomicroespatitos/bioespatitos (Folk, 1959) e como *grainstones* (Dunham, 1962). Se for adotada classificação híbrida entre a de arenitos terrígenos (Dott 1964) e a de rochas carbonáticas (Folk 1959), conforme proposto no item 3.8, os eolianitos de Luís Correia classificam-se como quartzo arenitos biomicroespatitos/bioespatitos e os de Trairi como sublitoarenitos. Estas classificações foram aferidas através dos dados obtidos nas análises modais. A Tabela 14 recapitula as principais observações feitas na petrografia óptica.

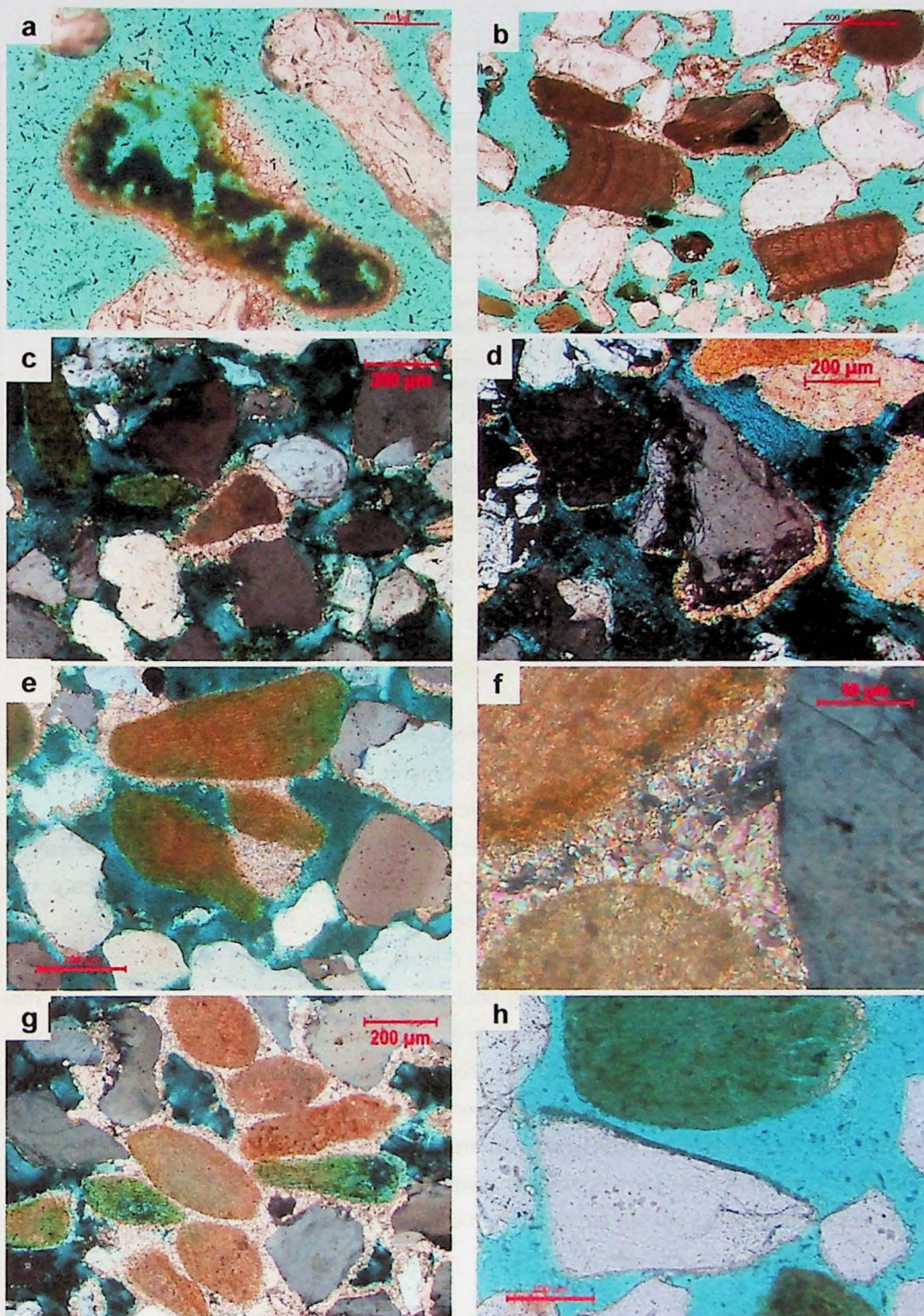


Figura 26. Feições de poro e cimento: a. porosidade móldica (amostra EPI-35E); b. algas corroídas com franja de cimento delgada (ECE-58); c. franja envolvente anisópaca (EPI-32E); d. cimento anisópaco pendular, em grãos de quartzo e carbonato (EPI-29E); e. cimento em menisco (EPI-33E); f. preenchimento intersticial espático (EPI-29E); g. cimento desenvolvido preferencialmente ao redor de bioclastos (EPI-32E); h. película escura sobre grão de quartzo (EPI-33E). Fotomicrografia a, b e h a nicóis paralelos, demais a nicóis cruzados.

Tabela 8. Síntese das considerações sobre a petrografia dos eolianitos deste estudo.

Critério de Descrição	Região	
	Carnaubinha-Maramar (Luís Correia, PI)	Imboaca e Guajiru (Trairi, CE)
Granulometria modal	Areia média a fina	Areia média a grossa
Seleção	Boa a moderada	Moderada
Grau de arredondamento e esfericidade	Subanguloso a arredondado e esfericidade variada	
Empacotamento	Aberto (IPkp de 0 a 10)	
Terrígenos	Quartzo monocristalino (>95% na fração)	Quartzo monocristalino (~70-75%), quartzo policristalino (~11%) e feldspatos (~10%)
Minerais acessórios	Feldspatos, quartzo policristalino, minerais pesados, micas, fragmentos líticos (xistos?)	Piroxênios, minerais pesados e fragmentos líticos
Bioclastos	Algas vermelhas (>85%), bivalves (5-10%), miliólídeos, corais, equinóides e cracas (<5%)	Algas vermelhas (30-35%), corais (20-25%), bivalves (10-15%), miliólídeos (10%), gastrópodes, equinóides e cracas (<5%)
Intraclastos	Argilo-orgânico-ferruginoso, com grãos de silte e areia muito fina terrígenos e bioclásticos	
Cimento carbonático	7-15%	5-7%
Poros	22-38%	23-28%
Classificação petrográfica	Quartzoarenitos bioespátitos	Sublitoarenitos bioespátitos

4.7. Composição do cimento carbonático

A partir das análises quantitativas e imagens de elétrons retroespalhados da MEV-EED, foi possível caracterizar quimicamente o cimento carbonático (Figura 27, ponto 4). Os componentes predominantes são O e Ca com pouco Mg. Em quantidades mínimas, às vezes, estão presentes Si, Al, Fe, Na e P (tabela anexa). O cimento corresponde a calcita (mineral determinado por DRX) com 1 a 4 mol % MgCO_3 , caracterizada como calcita pobre em Mg ou de baixo teor de Mg (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003; Stanley *et al.*, 2002).

Os bioclastos de algas vermelhas (Figura 27, ponto 1) também apresentam composição semelhante, com teor de Mg pouco mais elevado, tendo calcita com 7 a 8 mol % MgCO_3 . Tais valores permitem caracterizar a mineralogia da rodofícia dos eolianitos como calcita de alto Mg (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003; Stanley *et al.*, 2002).

A transição dos bioclastos de alga vermelha para cimento carbonático (Figura 27, pontos 2 e 3) apresenta porções mais amareladas e esverdeadas ao redor do bioclasto (Figura 27), em que foi possível identificar resquícios de resina (indicados pelos picos de Cl, S, Si) e enriquecimento em Mg em relação ao cimento e à alga.

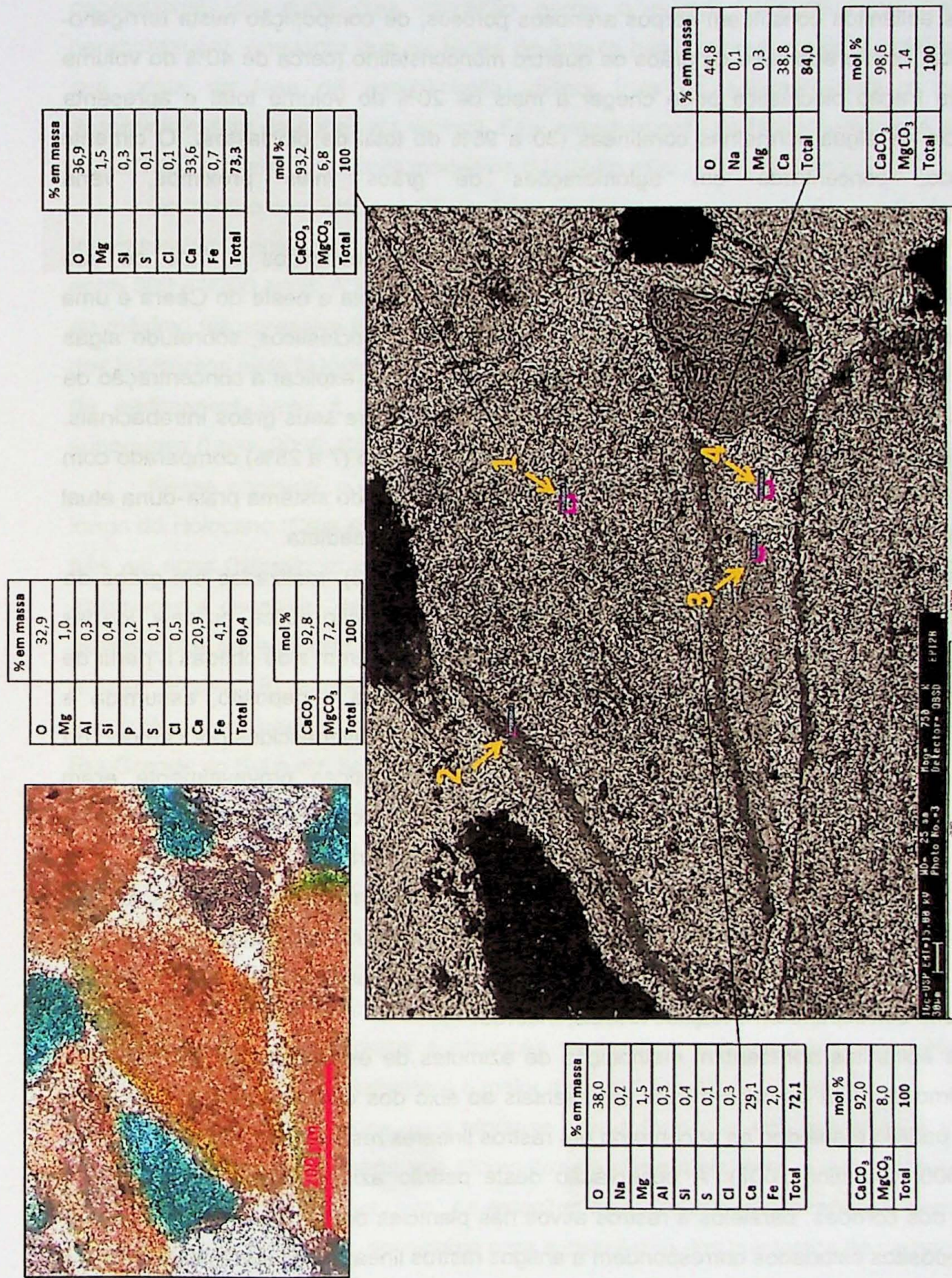


Figura 27. Fotomicrografia e eletromicrografia de retroespalhados com indicação das microanálises quantitativas por MEV-EED de cimento e alga vermelha (amostra EPI-28E).

5. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES

5.1. Evolução deposicional

Os eolianitos constituem corpos arenosos porosos, de composição mista terrígeno-carbonática, com predomínio de grãos de quartzo monocristalino (cerca de 40% do volume total). Sua fração bioclástica pode chegar a mais de 20% do volume total e apresenta abundância de algas vermelhas coralíneas (30 a 95% do total de bioclastos). O cimento carbonático, concentrado em aglomerações de grãos mais próximos, varia aproximadamente entre 5 e 15% do volume total.

A composição peculiar das areias que formam os eolianitos é fruto de sua localização. A plataforma continental adjacente entre Luís Correia e oeste do Ceará é uma das zonas mais ricas do Nordeste brasileiro em carbonatos bioclásticos, sobretudo algas vermelhas coralíneas (Kowsmann & Costa, 1979), o que ajuda a explicar a concentração de eolianitos nestas áreas e o predomínio desse tipo de alga dentre seus grãos intrabacinais. No entanto, o teor de carbonato (Tabela 5) nos eolianitos é baixo (7 a 28%) comparado com o registrado na plataforma submersa (>50%) e mais próximo ao do sistema praia-duna atual (4 a 18%), onde possivelmente se deve situar a sua área-fonte imediata.

As idades LOE dos eolianitos de Luís Correia (Tabela 3), realizadas em grãos de quartzo, são interpretadas como idades de estabilização da feição eólica, ou seja, idades mínimas da atividade eólica. Já as idades AMS (Tabela 4), por terem sido obtidas a partir de bioclastos, devem representar a idade máxima possível para o depósito, assumida a premissa de que os bioclastos não estejam substancialmente rejuvenescidos por carbono do solo. Com base nesses resultados, as carapaças carbonáticas provavelmente eram fornecidas ao depósito eólico pouco tempo depois da morte do organismo. Deste modo, parece que a plataforma recifal algácea e os eolianitos coexistiram.

Com base na caracterização das fácies morfológicas (mapas anexos), as feições eólicas ativas das áreas analisadas incluem dunas frontais, rupturas de deflação (*blowouts*), *nebkhas*, rastros lineares terrígenos, dunas parabólicas e cadeias barcanoides. Eolianitos e retrocordões correspondem a feições fósseis, inativas.

Os eolianitos apresentam distribuição de azimutes de estratificações cruzadas em padrão bimodal, com as duas modas transversais ao eixo dos cordões de eolianitos (Fig. 16). Este padrão é análogo ao encontrado em rastros lineares residuais modernos (Martinho *et al.*, 2006; Giannini, 2007). A observação deste padrão azimutal, associado à forma alongada dos cordões, paralelos a rastros ativos nas planícies de deflação, permite sugerir que os depósitos estudados correspondam a antigos rastros lineares residuais, estabilizados e cimentados.

As fácies deposicionais identificadas exibem cruzadas de ângulo baixo ou alto e com presença, abundante ou escassa a ausente, de rizoconcreções (Figuras 15 e 17). Na ordem

de empilhamento estratigráfico mais comum, as fácies com cruzadas de ângulo alto encontram-se subjacentes às de ângulo baixo, onde se concentram as rizoconcreções. As fácies de ângulo alto são interpretadas como de avanço da face externa, de caráter mais deposicional, da duna cuja migração gerou o rastro (parabólica ou barcana em parabolização), enquanto que as fácies de ângulo baixo reproduziriam o aplainamento de sua crista na fase de estabilização (menor taxa de sedimentação) e progressivo desenvolvimento da cobertura vegetal. Este empilhamento de fácies também é análogo ao encontrado em rastros lineares modernos (Martinho *et al.*, 2006; Giannini, 2007).

De acordo com idades LOE de Arias (2015), os eolianitos do Piauí e oeste do Ceará foram formados entre 5700 e 650 anos, mas cerca de 80% deles concentram-se no período entre 800 e 3200 anos. A idade máxima dos eolianitos coincide, grosso modo, com a época do máximo transgressivo holocênico (Bezerra *et al.*, 2003; Caldas *et al.*, 2006). Este foi um dos momentos mais favoráveis à iniciação dos campos de dunas, já que favoreceu o trânsito de sedimentos junto à linha de costa aproximadamente estável, sem progradação subaquosa (Lees, 2006; Giannini *et al.*, 2007; Mendes *et al.*, 2015).

Nesse contexto, o clima no Nordeste brasileiro experimenta aumento de aridez ao longo do Holoceno (Cruz *et al.*, 2009), com condições de seca sem precedentes nos últimos três mil anos (Novello *et al.*, 2012), apesar da provável intercalação de ciclos mais curtos (milenares a decadais) de períodos com mais ou menos chuvas. Um dos mais recentes destes ciclos corresponde ao aumento atual de aridez, verificado desde as décadas de 1960 a 1970 (Figura 28), antifásico com um aumento de umidade na mesma época na Região Sul-Sudeste do Brasil, e que tem levado à estabilização de campos de dunas costeiras no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina (Martinho *et al.* 2010, Mendes & Giannini 2015).

O clima mais seco e mais quente favorece ambientes propícios para a fauna carbonática na plataforma continental, sobretudo pela redução do aporte terrígeno e, por consequência, da turvação das águas. Favorece também ventos mais fortes (Amarante *et al.*, 2001), competentes para transportar as areias na região costeira e retrabalhá-las (Fig. 29). Já sob clima mais úmido, o aumento de precipitação, além de contribuir para a turvação da água e para a elevação da proporção de terrígenos na costa e plataforma, associa-se a ventos mais fracos e favorece a elevação do freático, a inundação mais frequente das interdunas e planícies de deflação e o maior desenvolvimento de vegetação.

A partir desses dados, uma hipótese para a formação dos eolianitos é a de que a formação das dunas ocorreria nos momentos de clima mais seco e sua estabilização, em períodos de aumento das chuvas. As estações mais úmidas favoreceriam a percolação de água meteórica superficial, necessária para a dissolução dos bioclastos de carbonato e para o aumento da concentração de bicarbonato na água intersticial, esta por sua vez requerida para a posterior geração do cimento carbonático.

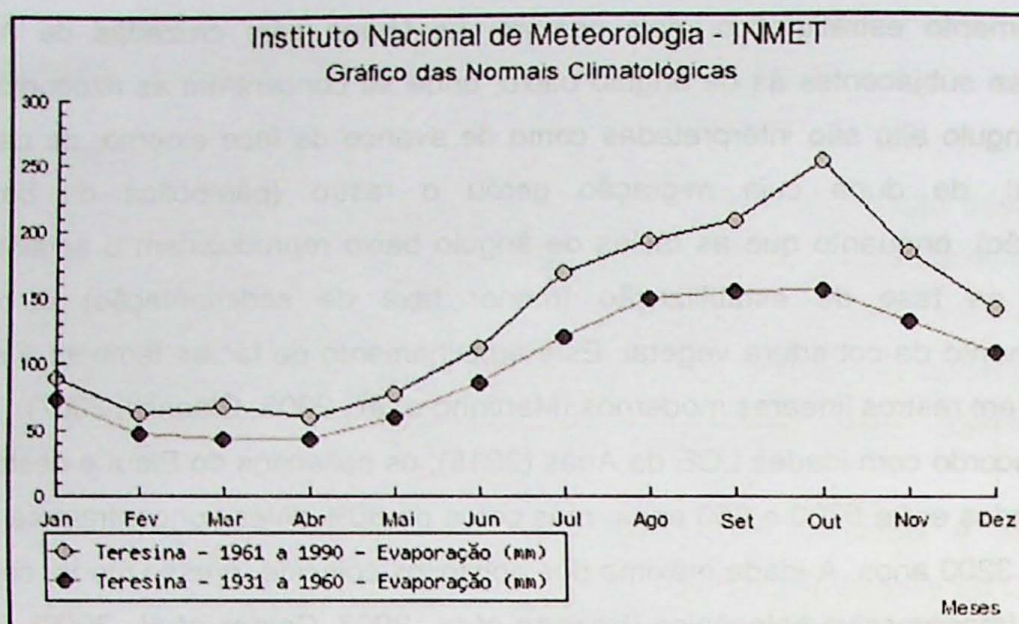


Figura 28. Evaporação (mm) em Teresina (PI). Dados compilados de 1931 a 1990 pelo INMET. Notar maior evaporação nas três décadas mais recentes dentro do intervalo de tempo compilado.

Com os dados de que se dispõe, os fatores que podem ser evocados para explicar a concentração espaço-temporal dos eolianitos analisados são: (1) área fonte carbonática, no caso, plataforma continental rica em carbonatos; favorecida por contexto de NRM alto; (2) iniciação de campos de dunas desencadeada no máximo transgressivo, com manutenção sob linha de costa aproximadamente estável; (3) clima seco e quente, que tanto favorece a fauna carbonática na área fonte quanto intensifica o regime dos ventos e acentua sua capacidade de erosão e transporte de areias costeiras; (4) intercalação de períodos mais úmidos, nos quais o aumento de precipitação e o enfraquecimento dos ventos facilitariam o desenvolvimento de vegetação e a estabilização das dunas, bem como a percolação da água pelos depósitos sedimentares, o que acelera a dissolução de bioclastos e o aumento relativo de bicarbonato em solução.

Em síntese, a história dos eolianitos se iniciaria com a deposição de seus sedimentos constituintes. O material exposto, provavelmente na praia, foi transportado pelos ventos alísios intensos da costa piauiense e cearense, com formação de campos de dunas eólicas, em sucessiva migração para o interior. Parte destas dunas continuam migrando até os dias atuais.

Com a migração sucessiva dos depósitos eólicos, em afastamento progressivo da linha de costa, começou a desenvolver-se a planície de deflação, com suas duas feições morfológicas mais características: os retrocordões e os rastros lineares residuais. Nesse contexto, tem início a formação dos depósitos correspondentes aos eolianitos, rastros lineares residuais sucessivamente deixados para trás e estabilizados à medida que o campo de dunas migrava. A presença, na base dos eolianitos, de fácies de cruzadas de ângulo alto, com rumos de mergulho subperpendiculares ao vento efetivo, é compatível com os flancos deposicionais íngremes de rastros lineares ativos e reforça a hipótese de sua associação com este tipo de feição. Além disso, por se tratar de feição da planície de deflação, rastros

lineares possuem taxas de deposição bem menores que as do campo de dunas propriamente dito, o que permite que a vegetação se desenvolva e interaja com a sedimentação, inclusive diminuindo os efeitos da erosão após o abandono do rastro pela duna em movimento. Este aspecto está bem representado, nos eolianitos estudados, pela fácies de cruzadas de ângulo baixo com rizoconcreções (Figura 15), cuja posição estratigráfica preferencial é no topo dos depósitos.

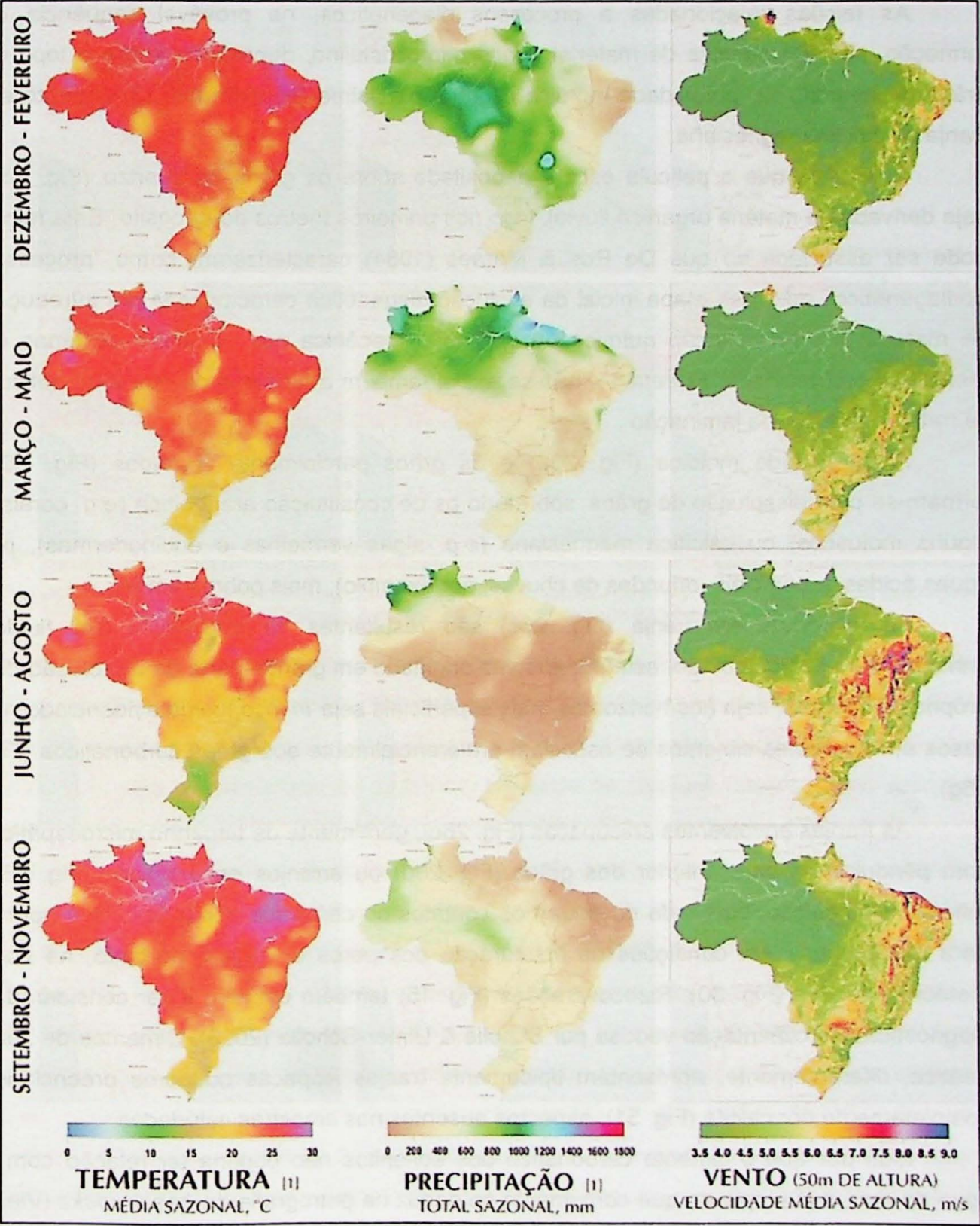


Figura 29. Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento sobre o Brasil. Notar que as estações com menos precipitação concentram os ventos mais fortes. Extraído de Amarante *et al.* (2001).

5.2. Evolução eodiagenética

Os processos diagenéticos dos eolianitos quaternários estudados ocorreram em superfície e sub-superfície rasa (menos de 20m de profundidade) e de modo precoce (eodiagênese), como evidenciado pelo empacotamento aberto, sem indícios de compactação mecânica e química ou de processos mais avançados de diagênese de soterramento.

As feições relacionadas a processos diagenéticos, na provável sequência de formação, são: (1) película de material opaco criptocristalino, depositada sobre o topo de grãos de quartzo; (2) porosidade móldica e grãos parcialmente corroídos; (3) cimento em franja de calcita magnesiana.

Sugere-se que a película escura depositada sobre os grãos de quartzo (Fig. 26h) seja derivada de matéria orgânica iluvial, logo nos primeiros metros do depósito. Esta feição pode ser associada ao que De Ros & Moraes (1984) caracterizaram como “processos eodiagenéticos aditivos”, etapa inicial da evolução diagenética caracterizada por introdução de material por precipitação química ou infiltração mecânica nas primeiras centenas de metros de profundidade. Entretanto, não se exclui também a hipótese de que a tal película se trate de artefato da laminação

A porosidade móldica (Fig. 26a) e os grãos parcialmente corroídos (Fig. 26b) formam-se pela dissolução de grãos, sobretudo os de constituição aragonítica (e.g. corais e alguns moluscos) ou calcítica magnesiana (e.g. algas vermelhas e equinodermas), por águas ácidas superficiais (oriundas de chuvas, por exemplo), mais pobres em Mg.

Os cimentos em franja (Fig. 26c) são resultantes da percolação por fluidos enriquecidos em bicarbonato, este por sua vez originado em grande parte da dissolução dos próprios bioclastos, seja nos horizontes mais superficiais seja *in loco*, como evidenciado nos casos em que estes cimentos se associam preferencialmente aos grãos carbonáticos (Fig. 26g).

As franjas envoltivas anisópacas (Fig. 26c), geralmente de tamanho microespático, com pêndulos na parte inferior dos grãos (Fig. 26d) ou arranjos em menisco (Fig. 26e) refletem distribuição localizada da água nos contatos ou cercanias dos grãos. Isso aponta para eodiagênese em condições de insaturação dos poros em água, portanto, na zona meteórica vadosa (Fig. 30). Rizoconcreções (Fig. 15) também chegam a ser consideradas diagnósticas de cimentação vadosa por Scholle & Ulmer-Scholle (2003). Cimentos de zona freática, diferentemente, apresentam tipicamente franjas isópacas ou poros preenchidos completamente por calcita (Fig. 31), aspectos ausentes nas amostras estudadas.

Mas por que o cimento carbonático dos eolianitos não poderia ter relação com a água do mar, a exemplo do que comumente se deduz na petrografia de *beach-rocks* (Vieira & De Ros, 2006; Voutsdoukas *et al.*, 2007)? A diagênese por influência marinha apresenta algumas feições morfológicas características, tais como envelopes micríticos, cimentos

carbonáticos com hábitos fibrosos e franjas isópacas, laminares ou até mesmo botrioidais. Contudo, essas feições não foram observadas nas amostras estudadas, apesar de não se descartar a possibilidade da presença de envelopes micríticos em grãos de algas vermelhas.

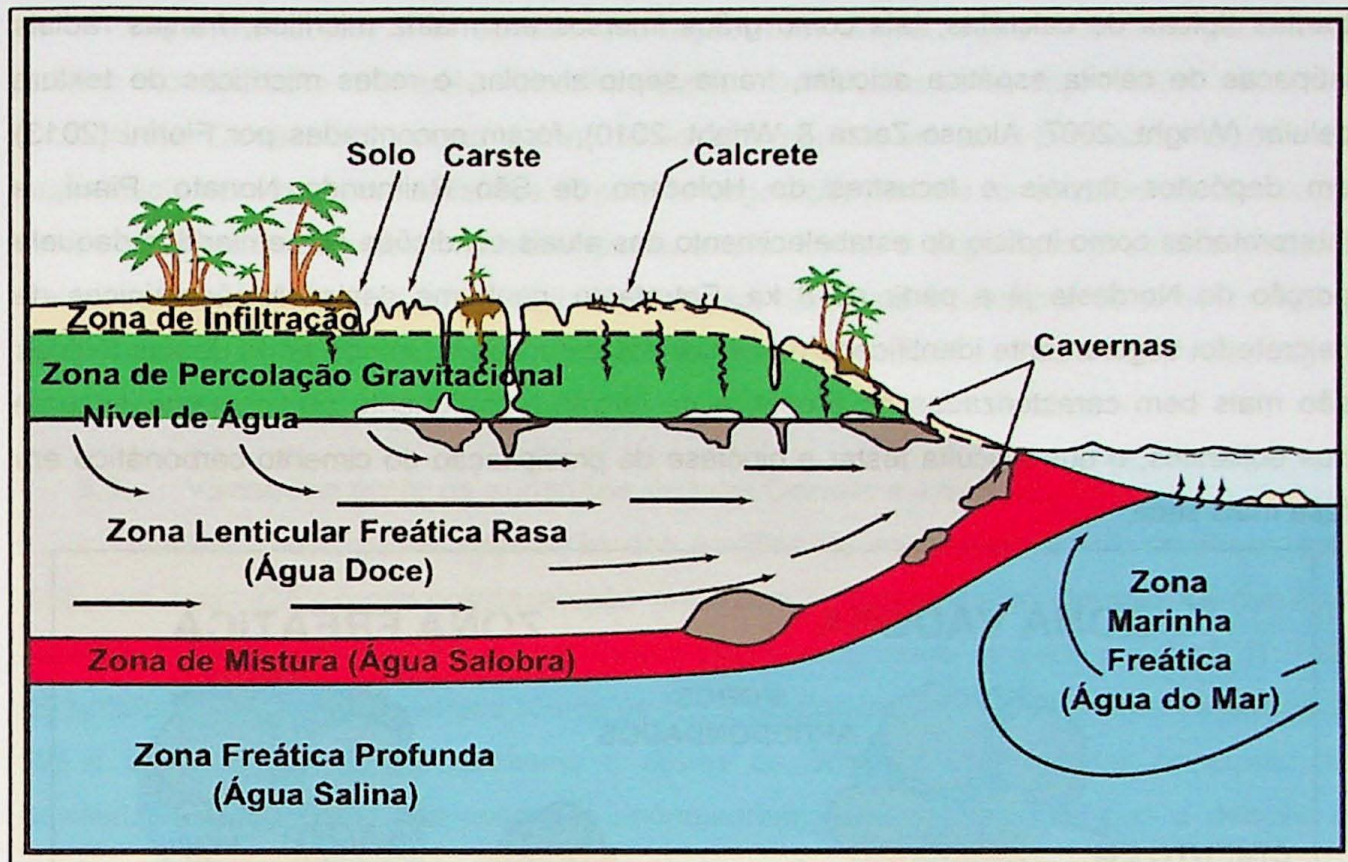


Figura 30. Zonas diagenéticas em regiões costeiras. A zona vadosa pode ser dividida em zona de infiltração e zona de percolação gravitacional. Traduzido de Scholle & Ulmer-Scholle (2003).

O cimento carbonático é constituído por calcita com 1 a 4 mol % $MgCO_3$ (vide item 4.7), caracterizada como de baixo Mg (Stanley *et al.*, 2002; Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). Esta composição pode indicar possíveis ambientes de formação, ainda que não de modo conclusivo, pois a estabilidade do carbonato depende de diversos fatores, como salinidade da água, proporção Mg/Ca, temperatura, entre outros. Sabe-se que há extensa dissolução de minerais carbonáticos na zona meteórica com decorrente reprecipitação, quando é possível formarem-se carbonatos de composição distinta da original, como no caso de calcita rica em Mg repostada por calcita com baixo Mg (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). Este fato permite sugerir que o cimento carbonático nos eolianitos advém da dissolução de bioclastos e, posteriormente, reprecipitação local. Os bioclastos de alga vermelha destes eolianitos, que, em vista de sua abundância, tiveram sua composição química verificada neste trabalho, apresentam teor mais elevado em Mg (7 a 8 mol % $MgCO_3$) do que o cimento carbonático e parte de seus grãos encontram-se corroídos (Fig. 26b), o que aponta para a possibilidade de o bicarbonato que gera o cimento ser resultante de sua dissolução.

Nessas circunstâncias, contudo, não se sabe ao certo em que condição climática o cimento precipitaria preferencialmente, se já durante os períodos de aumento de

precipitação ou se somente depois deles, via evaporação. Uma maneira de avaliar e de tentar responder a esta questão, é comparar as texturas e tramas de cimentação dos eolianitos com as de calcretes, os quais se formam tipicamente em climas áridos a semiáridos, sob condições de evaporação maior que precipitação. Por exemplo, texturas e tramas típicas de calcretes, tais como grãos imersos em matriz micrítica, franjas radiais isópacas de calcita espática acicular, trama septo-alveolar, e redes micríticas de textura celular (Wright, 2007; Alonso-Zarza & Wright, 2010), foram encontradas por Fiorini (2013) em depósitos fluviais e lacustres do Holoceno de São Raimundo Nonato, Piauí, e interpretadas como indício do estabelecimento das atuais condições de semiaridez daquela porção do Nordeste já a partir de 8 ka. Entretanto, nenhuma destas feições típicas de calcrete foi seguramente identificada nos eolianitos estudados. Grande parte destas feições são mais bem caracterizadas na presença de micrita, componente praticamente ausente nos eolianitos, o que dificulta testar a hipótese de precipitação do cimento carbonático em fase mais seca.

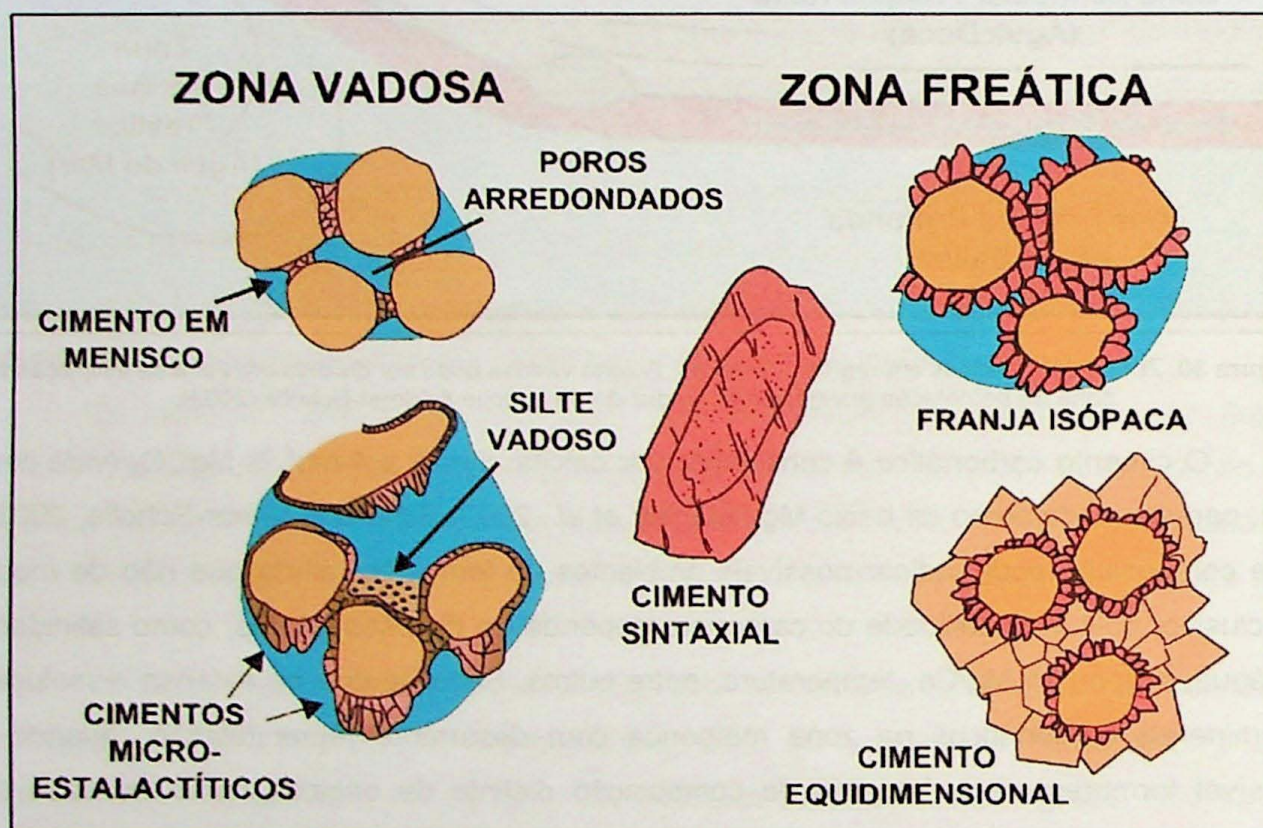


Figura 31. Tipos de cimento conforme zonas meteóricas. Traduzido de Scholle & Ulmer-Scholle (2003).

O teor de carbonato atualmente mais baixo nas praias em comparação aos eolianitos pode ser explicado por um ou mais dentre os seguintes fatores: (1) adição eodiagenética de carbonato por cimentação, o que aumenta seu teor em relação às areias de praia nos casos em que ocorrer em quantidade maior do que a porção dissolvida dos bioclastos (fonte do carbonato); (2) presença adicional de bioclastos e conchas carbonáticas inteiras de moluscos terrestres, com destaque para gastrópodes pulmonados ou aquáticos, que se concentram nas áreas de substrato endurecido ou de interdunas úmidas (Arias, 2015); (3)

seleção aerodinâmica pelo vento, com concentração preferencial, residual, de bioclastos (mais densos), mais efetiva nos depósitos eólicos deflacionários, que caracterizam os eolianitos, do que nas praias; (4) mudança na composição da praia (aumento relativo de terrígenos), no tempo.

Em resumo, em uma época ou estação mais úmida, água meteórica poderia se infiltrar no depósito de areia, dissolver parte dos bioclastos e reprecipitar carbonato localmente. Os rastros lineares seriam cimentados apenas em seus primeiros metros mais superficiais, formando os eolianitos. A própria vegetação poderia ter ajudado na dissolução com a liberação de ácidos orgânicos, por exemplo. Como a vegetação já estava presente pelo menos antes da fase principal de cimentação, haja vista a presença de rizoconcreções nos eolianitos, deve-se admitir a existência, por mínima que seja, de algum rejuvenescimento das idades ^{14}C AMS dos bioclastos por carbono do solo.

5.3. Variações entre os eolianitos de Luís Correia e Trairi

Nota-se mudança na orientação dos cordões de eolianitos, de NE, no Piauí, para ESE, em Trairi (CE), o que possui relação direta com a origem dos ventos efetivos nas duas regiões. O litoral compreendido entre Piauí e Ceará encontra-se na parte sul da ZCIT, faixa de umidade para onde os ventos alísios de NE e SE convergem, com domínio de alísios de NE a norte, passando gradualmente a alísios de SE, a sul. As modas principais das estratificações cruzadas dos eolianitos acompanham essa mudança, já que a direção do vento se encontra na bissetriz do ângulo entre as modas.

Em comparação com os eolianitos de Luís Correia, as amostras de Trairi contêm maior riqueza em terrígenos, com relativa imaturidade mineralógica, o que deve refletir maior proximidade da área-fonte, seja pela posição da praia a barlamar da deriva litorânea regional (rumo W), seja pela menor distância do eolianito à praia. Este segundo aspecto relaciona-se com o aporte eólico relativo (relação entre volume de sedimento eólico suprido e espaço de acumulação) aparentemente maior no Ceará, como evidenciado pelo campo de dunas mais saturado de areia, em detrimento da zona de deflação. A planície de deflação em Luís Correia é mais extensa e seus cordões de eolianito mais longos e delgados que os de Trairi, onde os depósitos eólicos em geral, e os de eolianito em particular, estão mais próximos à praia e atingem maior altura.

A tendência granulométrica regional de afinamento dos eolianitos, com melhora de seleção e assimetria mais negativa, do Ceará para o Piauí, é sugestiva de aumento do grau de transporte sedimentar nesse rumo. A exemplo da redução no teor de terrígenos no mesmo rumo, esta melhora de maturidade textural pode ter influência da deriva litorânea regional de E (Ceará) para W (Piauí) e/ou do fato de os eolianitos do Piauí serem mais distais em relação à praia, portanto com maior distância de retrabalhamento eólico.

As amostras de Trairi contêm menor teor de carbonato e menor quantidade de cimento. Essa variação em relação a Luís Correia deve ser resultado da posição da plataforma carbonática, mais distante da costa no Ceará do que no Piauí.

A observada maior saturação em areia dos campos de dunas do Ceará, em comparação com os do Piauí, pode ser atribuída à razão mais elevada entre aporte eólico relativo (relação entre aporte absoluto e energia do vento) e espaço de acumulação eólica. Uma possibilidade seria a de que o vento efetivo fosse mais intenso no Piauí de que no Ceará, com estoques sedimentares e espaços de acumulação similares nas duas áreas. No entanto, dados de Amarante *et al.* (2001) mostram que a velocidade média dos ventos na costa cearense é maior do que na do Piauí, o que leva a interpretar, portanto, que a maior saturação eólica no Ceará deva-se ou a maior estoque de areia costeira disponível ao retrabalhamento eólico e/ou a espaço de acumulação mais reduzido.

5.4. Efeito da diagênese nas características do reservatório

A diagênese precoce nos eolianitos possibilitou a preservação dos depósitos e apresentou um paradoxo em termos de manutenção de porosidade: ao mesmo tempo que o cimento ocupa parte dos espaços anteriormente livres (poros), ele não interfere tanto na porosidade original, pois ainda ajuda a proteger-se dos efeitos de compactação, mecânica ou química, subsequentes. Além disso, a formação precoce de franjas carbonáticas retarda a dissolução dos bioclastos a partir de então, o que ajuda a explicar a distribuição superficial da cimentação.

A redução da porosidade e permeabilidade da porção superficial dos rastros lineares residuais, devido à precipitação precoce do cimento, desacelerou a taxa de percolação das águas e impediu que a cimentação avançasse além dos primeiros poucos metros de profundidade. Assim, os eolianitos, apesar de relativamente frágeis e pouco cimentados, preservaram a morfologia original em cordão dos rastros lineares e, ao mesmo tempo, protegeram da redução de porosidade os depósitos eólicos mais profundos, os quais, potencialmente, são boas rochas-reservatórios.

Os eolianitos dispõem-se como corpos alongados e estreitos, com pouca expressão em volume, porém recorrentes, próximos uns aos outros, e apresentam cruzadas com caimentos em rumos aproximadamente opostos. Reservatórios com características semelhantes aos eolianitos (corpos alongados, com cruzadas com caimentos opostos, alternando baixo e alto ângulo) podem muito provavelmente terem sido interpretados como depósitos subaquosos, de maré por exemplo, e a existência de eolianitos pré-quadernários pode, assim, estar fortemente subestimada (Frebourg *et al.*, 2008).

6. CONCLUSÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos e das discussões feitas ao longo deste trabalho, é possível listar as seguintes conclusões finais:

- 1) Os eolianitos de Maramar e Luís Correia constituem rochas grão-suportadas, muito porosas e poucos cimentadas. Sua composição mista terrígeno-bioclástica caracteriza-se pela abundância de grãos de quartzo monocristalino (>40% do volume total) e algas vermelhas coralíneas (30 a 95% do total de bioclastos).
- 2) Os processos diagenéticos dos eolianitos estudados ocorreram em estágio raso e precocemente (eodiagênese), com formação de cimento carbonático em zona meteórica vadosa.
- 3) O cimento, composto por calcita de baixo Mg (1 a 4 mol % $MgCO_3$), provém da dissolução de bioclastos, seguida de reprecipitação localizada.
- 4) A diagênese possibilita a preservação dos depósitos, ao protegê-los dos efeitos de compactação subsequentes, e diminui a permeabilidade superficial, o que permite resguardar a porosidade original dos depósitos eólicos mais profundos.
- 5) Vários são os fatores que contribuem para a distribuição espaço-temporal dos eolianitos: (1) plataforma rica em carbonatos, (2) desenvolvimento de campos de dunas, (3) clima seco para a formação de dunas e (4) períodos úmidos para a estabilização das dunas e geração do bicarbonato, matéria-prima do cimento.
- 6) A estabilização das dunas deve ocorrer em tempo mais úmido, mas não houve dados conclusivos sobre precipitação preferencial de carbonato em fase úmida ou seca.
- 7) Os eolianitos estudados são rastros lineares residuais de antigas dunas e se localizam na planície de deflação.
- 8) A formação de eolianitos está ligada à composição da plataforma continental adjacente e a zona principal de sua ocorrência na costa nordeste do Brasil coincide com o trecho em que a plataforma carbonática se encontra mais rasa e próxima da costa.
- 9) Os eolianitos de Luís Correia são mais distais em relação à praia e mais delgados e maduros textural e mineralogicamente que os de Trairi. Esta e outras diferenças entre os depósitos de Luís Correia e Trairi são reflexo de vários fatores inter-relacionados: (1) mudança da orientação dos ventos e no seu ângulo com a costa; (2) proximidade da área-fonte carbonática; (3) diferenças de aporte eólico relativo; (4) deriva litorânea regional, de E para W; (5) contrastes de velocidade dos ventos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abegg, F. E.; Loope, D. B.; Harris, P. M. 2001. Carbonate eolianites - Depositional models and diagenesis. *In*: Abegg F. E.; Harris, P. M.; Loope, D. B. (eds.) *Modern and ancient carbonate eolianites. SEPM Special Publication*, 71: 17-30.
- Alonso-Zarza, A. M.; Wright, V. P. 2010. Calcretes. *In*: Alonso-Zarza A. M. & Tanner L. H. (Eds.). *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Processes*. UK: Elsevier, 224-267.
- Amarante, O. A. C.; Brower, M.; Zack, J.; De Sá, A. L. 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: CRESESB. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. Acessado em 30/10/2015.
- Angulo, R. J.; Souza, M. C.; Fernandes, L. A.; Disaró, S. T. 2013. Quaternary sea-level changes and aeolianites in the Fernando de Noronha archipelago, northeastern Brazil. *Quaternary International*, 305: 15-30.
- Arias, V. E. 2015. *Fatores controladores de sistemas eólicos costeiros carbonáticos: Os eolianitos quaternários do Piauí e oeste do Ceará*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Inédito.
- Bezerra, F. H. R.; Barreto, A. M. F.; Suguio, K. 2003. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State Coast, Brazil. *Marine Geology*, 196: 73–89.
- Brooke, B. 2001. The distribution of carbonate eolianite. *Earth-Science Reviews*, 55: 135–164.
- Caldas, L. H. O.; Stattegger, K.; Vital, H. 2006. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, 228: 39-53.
- Carvalho, A. M.; Claudino-Sales, V.; Maia, L. P.; Castro, J. W. A. 2008. *Eolianitos de Flecheiras/Mundaú, Costa Noroeste do Estado do Ceará, Brasil*. Disponível em: http://sigep.cprm.gov.br/sitio118/sitio118_impresso.pdf. Acessado em: 30/10/2015.
- Castro, J. W. A.; Ramos, R. R. C. 2006. Idade das dunas móveis transversais no segmento entre Macau e Jericoacoara – Litoral Setentrional do Nordeste Brasileiro. *Arquivos do Museu Nacional*, Rio de Janeiro, 64(4): 361-367.
- Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Da Silva, M. G. A. J.; Dias, M. A. F. S. 2009. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 463p.
- Chayes, F. 1956. *Petrographic modal analysis: an elementary statistical appraisal*. John Wiley & Sons: New York, 113p.
- Cruz Jr., F. W.; Vuille, M.; Burns, S. J.; Wang, X.; Cheng, H.; Werner, M.; Edwards, R. L.; Karmann, I.; Auler, A. S.; Nguyen, H. 2009. Orbitally driven east-west antiphasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, 2: 210-214.

- Dott, R. H. 1964. Wacke, greywacke and matrix; what approach to immature sandstone classification? *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 34(3): 625–632.
- Dunham, R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.) *Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists*, 1: 108-121.
- Fairbridge, R. W.; Johnson, D. L. 1978. Eolianite. In: Fairbridge, R. W.; Bourgeois, J. (eds.) *The Encyclopedia of Sedimentology*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, PA, 279–282.
- Fiorini, P.; Giannini, P. C. F.; Mendes, V. R. 2013. Gênese de calcretes no semiárido nordestino durante o Quaternário tardio. XIV Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), Natal, RN. Resumos de Trabalhos, 201.
- Folk, R. L.; Ward, W. C. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3–26.
- Folk, R. L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 43, p. 1-38.
- Folk, R. L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. In: Ham, W.E. (ed.) *Classification of carbonate rocks. Symposium: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1: 62-84.
- Folk, R. L. 1968. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, Texas (HemphillPs Book Store).
- Frebourg, G.; Hasler, C-A.; Le Guern, P.; Davaud, E. 2008. Facies characteristics and diversity in carbonate eolianites. *Facies*, 54: 175–191.
- Frebourg, G. 2010. *Carbonate Coastal Dunes: Potential Reservoir Rocks?* Tese de Doutorado, Faculté Des Sciences, Université De Genève , Genève, 178 p.
- Fryberger, S. G.; Schenk, C. 1988. Pin stripe lamination: a distinctive feature of modern and ancient eolian sediments. *Sedimentary Geology*, 55: 1-15.
- Giannini, P. C. F. 2007. *Sistemas Depositionais Eólicos no Quaternário Costeiro do Brasil*. Tese de Livre-docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, v.1, 205 p.
- Giannini, P. C. F.; Sawakuchi, A. O.; Martinho, C. T.; Tatum, S. H. 2007. Eolian depositional episodes controlled by Late Quaternary relative sea level changes on the Imituba-Laguna coastal zone (southern Brazil). *Marine Geology*, 237: 143-168.
- Hearty, P. J.; O'Leary M. J. 2008. Carbonate eolianites, quartz sands, and Quaternary sea-level cycles, Western Australia: A chronostratigraphic approach. *Quaternary Geochronology*, 3: 26–55.
- Kahn, J. S. 1956. The analysis and distribution of the properties of packing in sand-size sediments: 1. On the measurement of packing in sandstones. *Journal of geology*, 64: 385-395.

- Kowsmann, R. O.; Costa, M. P. A. 1979. *Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, CENPES, DINTEP. 55p. ilustr. (Série Projeto REMAC, n. 8)
- Lees, B. 2006. Timing and formation of coastal dunes in northern and eastern Australia. *Journal of Coastal Research*, 22(1): 78-89.
- Martinho, C. T.; Giannini, P. C. F.; Sawakuchi, A. O.; Hesp, P. A. 2006. Morphological and depositional facies of transgressive dunefields in the Imbituba-Jaguaruna region, Santa Catarina State, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39: 673-677.
- Martinho, C. T.; Hesp, P. A.; Dillenburg, S. R. 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology* (Amsterdam), 117: 4-32.
- McLaren, P.; Bowles, D. 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(5): 457-470.
- Mendes, V. R.; Giannini, P. C. F. 2015. Coastal dunefields of south Brazil as a record of climatic changes in the South American Monsoon System. *Geomorphology* (Amsterdam), 246: 22-34.
- Mendes, V. R.; Giannini, P. C. F.; Guedes, C. C. F.; Dewitt, R.; Andrade, H. A. A. 2015. Central Santa Catarina coastal dunefields chronology and their relation with relative sea level and climatic changes. *Brazilian Journal of Geology* (online).
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurement*, 32: 57-73.
- Novello, V. F.; Cruz Jr., F. W.; Karmann, I.; Burns, S. J.; Strikis, N. M.; Vuille, M.; Cheng, H.; Edwards, R. L.; Santos, R. V.; Frigo, E.; Barreto, E. 2012. Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophysical Research Letters*, 39: 1-6.
- Pettijohn, F. J.; Potter, P. E.; Siever, R. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, Berlim, 1973, 618p.
- Powers, M. C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles: *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2):117-119.
- Pye, K. and Tsoar, H. 2009. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springer, Berlin, 476 p.
- Reimer, P. J.; Baillie, M. G. L.; Bard, E.; Bayliss, A.; Beck, J. W.; Blackwell, P. G.; Bronk Ramsey, C.; Buck, C. E.; Burr, G. S.; Edwards, R. L.; Friedrich, M.; Grootes, P. M., Guilderson, T. P.; Hajdas, I.; Heaton, T. J.; Hogg, A. G.; Hughen, K. A.; Kaiser, K. F.; Kromer, B.; McCormac, F. G.; Manning, S. W.; Reimer, R. W.; Richards, D. A.; Southon, J. R.; Talamo, S.; Turney, C. S. M.; Van der Plicht, J.; Weyhenmeyer, C. E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51(4): 1111-50.

- Ros, L. F.; Moraes, M. A. S. 1984. Sequência Diagenética em Arenitos: Uma discussão inicial. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 894-904. Rio de Janeiro.
- Sayles, R. W. 1931. Bermuda during the ice age. *Proceeding of the America Academy of Arts and Science*, 66: 381-467.
- Scholle, P. A.; Ulmer-Scholle, D. S. 2003. *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis*. Canada: AAPG Memoir 77, 459p.
- Smith, A. J.; Massuel, S.; Pollock, D. W. 2012. Geohydrology of the Tamala Limestone Formation in the Perth region: Origin and role of secondary porosity. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship. Disponível em: <http://www.clw.csiro.au/publications/waterforahealthycountry/2012/wfhc-tamala-geohydrology.pdf>. Acessado em: 28/07/2015.
- Stanley, S. M.; Ries, J. B.; Hardie, L. A. 2002. Low-magnesium calcite produced by coralline algae in seawater of Late Cretaceous composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 24, 15323-15326.
- Tucker, M. E.; Wright, V. P. 1990. *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 479p.
- Vasconcelos, A.M., Torres, P.F.M., Forgiarini, L.L., Medeiros, M. de F. 2004. Folha SA.24-Fortaleza. In: Schobbenhaus, C. Gonçalves, J.H., Santos, J.O.S, Abram, M.B, Leão Neto, R., Matos, G.M.M, Vidotti, R.M, Ramos, M.A.B, Jesus, J.D.A. de (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília.
- Vieira, M. M.; De Ros, L. F. 2006. Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 192(15): 207-230.
- Vousdoukas, M.I.; Velegrakis, A.F.; Plomaritis, T.A. 2007. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. *Earth-Science Reviews*, 85: 23-46.
- Walker, R. G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker, R. G. & James, N. P. (eds.) *Facies Models: Response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, St John's, Newfoundland, p. 1-14.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30:377-392.
- Wintle A. G.; Murray A. S. 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41(4): 369-391.
- Wright, L. D.; Chappell, J.; Thom, B. G.; Bradshaw, M. P; Cowell, P. 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: southeastern Australia. *Mar. Geol.*, 32: 105-140.
- Wright, V. P. 2007. Calcrete. In: Nash D. J. & McLaren S. J. (Eds). *Calcretes in Geochemical Sediments and Landscapes*. Blackwell Oxford, 10-45.

ANEXOS

APÊNDICE A - Resultados de análises de dosagem de carbonato por ataque ácido

APÊNDICE B - Resultados de análises granulométricas por difração de laser

APÊNDICE C - Resultados de análises por MEV-EED (SEM-EDS)

APÊNDICE D - Mapas de fácies morfológicas

APÊNDICE A - Resultados de análises de dosagem em massa de carbonato por ataque ácido

Código da amostra	Teor de carbonato (%)
EPI-23P	13,7
EPI-24E	16,3
EPI-26P	17,5
EPI-27E	28,4
EPI-28E	21,3
EPI-29E	18,9
EPI-29E	25,3
EPI-31E	21,3
EPI-32E	16,4
EPI-33E	28,3
EPI-34EA	25,1
EPI-34EB	25,8
EPI-35E	20,3
EPI-36P	15,5
EPI-37E	6,7
ECE-54P	4,2
ECE-55E	14,8
ECE-57P	8,9
ECE-58E	20,4

APÊNDICE B

Resultados de análises
granulométricas por difração de laser

APÊNDICE B

**Resultados de análises
granulométricas por difração de laser**

APÊNDICE B - Resultados de análises granulométricas por difração de laser

AMOSTRAS IN NATURA

Estatísticas da Distribuição Granulométrica (phi) - Pearson																			
Amostra	Faixa Granulométrica (%)										Incluindo Material Pelítico					Excluindo Material Pelítico			
	Areia					Silte					Argila	Diâmetro Médio (φ)	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	Diâmetro Médio (φ)	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Grosso	Médio	Fino	Muito Fino										
										0,25									
EPI23P	0,000	0,012	18,206	66,470	15,311	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,533	0,497	-0,039	2,550	2,533	0,497	-0,039	2,550
EPI24E	13,031	7,401	26,882	32,758	8,942	2,245	3,325	1,980	1,381	2,054	2,331	1,839	1,546	6,655	6,655	1,823	1,053	-0,492	2,608
EPI26P	1,227	1,052	33,590	56,969	7,162	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,242	0,607	-0,885	5,744	5,744	2,242	0,607	-0,885	5,744
EPI27E	5,045	5,216	26,787	34,303	11,326	3,616	4,227	2,754	1,834	4,892	2,924	2,145	1,727	6,175	6,175	2,105	0,910	-0,497	3,226
EPI28E	5,799	10,576	38,675	25,066	4,409	3,561	3,252	2,678	2,035	3,948	2,527	2,105	1,946	6,782	6,782	1,754	0,819	-0,017	3,136
EPI29E	2,718	11,140	50,932	26,361	0,617	1,893	1,686	1,367	1,134	2,153	2,129	1,605	2,957	12,964	12,964	1,712	0,607	-0,073	2,634
EPI31E	15,893	14,986	29,393	19,870	6,875	1,534	2,514	2,235	1,559	5,140	2,294	2,328	1,925	6,650	6,650	1,528	1,021	0,158	2,397
EPI32E	11,396	19,368	40,360	12,946	3,608	2,616	2,214	2,055	1,412	4,026	2,117	2,131	2,293	8,198	8,198	1,427	0,810	0,668	3,579
EPI33E	6,781	14,656	36,648	19,112	4,282	2,419	3,806	3,920	2,418	5,960	2,662	2,431	1,739	5,324	5,324	1,634	0,816	0,382	2,795
EPI34EA	4,726	9,968	39,197	23,330	2,664	4,657	4,121	3,378	2,465	5,494	2,751	2,336	1,738	5,490	5,490	1,727	0,763	-0,008	3,401
EPI34EB	7,761	10,909	42,499	24,912	2,075	3,619	2,644	1,877	1,455	2,250	2,202	1,794	2,116	8,297	8,297	1,649	0,794	-0,281	3,374
EPI35E	5,229	4,387	24,859	36,398	12,681	4,111	4,745	2,745	1,848	2,998	2,850	1,906	1,571	6,191	6,191	2,160	0,923	-0,643	3,455
EPI36P	0,000	0,000	14,945	66,595	18,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,599	0,490	0,011	2,471	2,471	2,599	0,490	0,011	2,471
EPI36D	18,169	11,667	30,755	31,667	7,742	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,643	1,054	-0,289	2,272	2,272	1,643	1,054	-0,289	2,272
EPI37E	17,041	16,616	32,854	13,330	5,650	5,158	3,625	2,326	1,368	2,033	2,060	1,978	1,672	6,028	6,028	1,392	0,993	0,438	3,017
ECE64P	3,497	6,710	48,532	39,582	1,679	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,874	0,664	-0,686	4,032	4,032	1,874	0,664	-0,686	4,032
ECE65E	42,927	20,183	20,685	4,627	2,460	1,950	1,859	1,587	1,056	2,665	1,287	2,076	2,458	9,470	9,470	0,727	0,926	0,918	4,143
ECE66D	9,426	15,522	35,706	26,115	10,685	0,476	0,743	0,607	0,333	0,386	1,894	1,190	1,577	8,526	8,526	1,783	0,947	0,224	2,262
ECE67P	18,924	7,758	29,748	37,192	6,378	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,679	1,071	-0,559	2,397	2,397	1,679	1,071	-0,559	2,397
ECE68E	12,716	16,413	31,651	18,517	6,994	3,886	3,112	2,274	1,652	2,785	2,237	2,006	1,826	6,576	6,576	1,578	0,965	0,402	2,564

APÊNDICE B - Resultados de análises granulométricas por difração de laser

AMOSTRAS SUBMETIDAS PREVIAMENTE A ATAQUE QUÍMICO

Amostra	Faixa Granulométrica (%)										Estatísticas da Distribuição Granulométrica (phi) - Pearson														
	Areia					Silte					Argila					Incluindo Material Pelítico					Excluindo Material Pelítico				
	Muito Grossa	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Grosso	Médio	Fino	Muito Fino	Argila		Diâmetro Médio (φ)	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	Diâmetro Médio (φ)	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose						
	0,25	0,75	1,75	2,75	3,75	4,5	5,5	6,5	7,5	9															
EPI23P	0,000	0,000	12,073	72,492	15,435	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,44	0,026	2,532	2,597	0,44	0,026	2,532	2,597	0,44	0,026	2,532		
EPI24E	0,000	1,109	31,892	56,499	10,501	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,574	-0,06	2,504	2,325	0,574	-0,06	2,504	2,325	0,574	-0,06	2,504		
EPI26P	1,803	0,191	28,442	62,335	7,229	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,595	-1,296	7,539	2,297	0,595	-1,296	7,539	2,297	0,595	-1,296	7,539		
EPI27E	0,000	0,018	28,207	58,795	12,980	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,552	0,055	2,435	2,409	0,552	0,055	2,435	2,409	0,552	0,055	2,435		
EPI28E	0,000	4,144	55,155	39,235	1,466	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,524	0,122	2,457	1,941	0,524	0,122	2,457	1,941	0,524	0,122	2,457		
EPI29E	0,000	4,169	54,697	39,583	1,552	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,526	0,115	2,458	1,946	0,526	0,115	2,458	1,946	0,526	0,115	2,458		
EPI31E	7,070	17,141	42,974	27,034	5,781	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,808	0,248	2,359	1,702	0,808	0,248	2,359	1,702	0,808	0,248	2,359		
EPI32E	4,026	18,921	56,186	20,263	0,604	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,606	0,22	2,54	1,551	0,606	0,22	2,54	1,551	0,606	0,22	2,54		
EPI33E	7,198	21,091	48,563	19,634	3,514	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,736	0,528	2,887	1,546	0,736	0,528	2,887	1,546	0,736	0,528	2,887		
EPI34EA	0,000	4,129	57,968	37,332	0,571	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,493	0,061	2,509	1,905	0,493	0,061	2,509	1,905	0,493	0,061	2,509		
EPI34EB	0,000	2,769	56,964	39,740	0,528	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,475	0,057	2,497	1,941	0,475	0,057	2,497	1,941	0,475	0,057	2,497		
EPI 35E	0,000	0,000	22,473	63,830	13,697	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,517	-0,012	2,497	2,475	0,517	-0,012	2,497	2,475	0,517	-0,012	2,497		
EPI36P	0,000	0,000	8,785	73,016	18,199	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,431	0,005	2,596	2,657	0,431	0,005	2,596	2,657	0,431	0,005	2,596		
EPI37E	21,593	20,154	34,184	19,343	4,726	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,937	0,328	2,407	1,364	0,937	0,328	2,407	1,364	0,937	0,328	2,407		
ECE64P	2,347	6,163	47,393	42,109	1,987	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,628	-0,499	3,504	1,932	0,628	-0,499	3,504	1,932	0,628	-0,499	3,504		
ECE66E	45,075	22,485	23,958	6,588	1,787	0,107	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,897	0,725	3,588	0,756	0,891	0,695	3,473	0,756	0,891	0,695	3,473		
ECE67P	18,044	8,013	30,760	37,346	5,837	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,046	-0,574	2,46	1,684	1,046	-0,574	2,46	1,684	1,046	-0,574	2,46		
ECE68E	15,913	20,201	37,884	21,335	4,667	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,88	0,33	2,438	1,473	0,88	0,33	2,438	1,473	0,88	0,33	2,438		

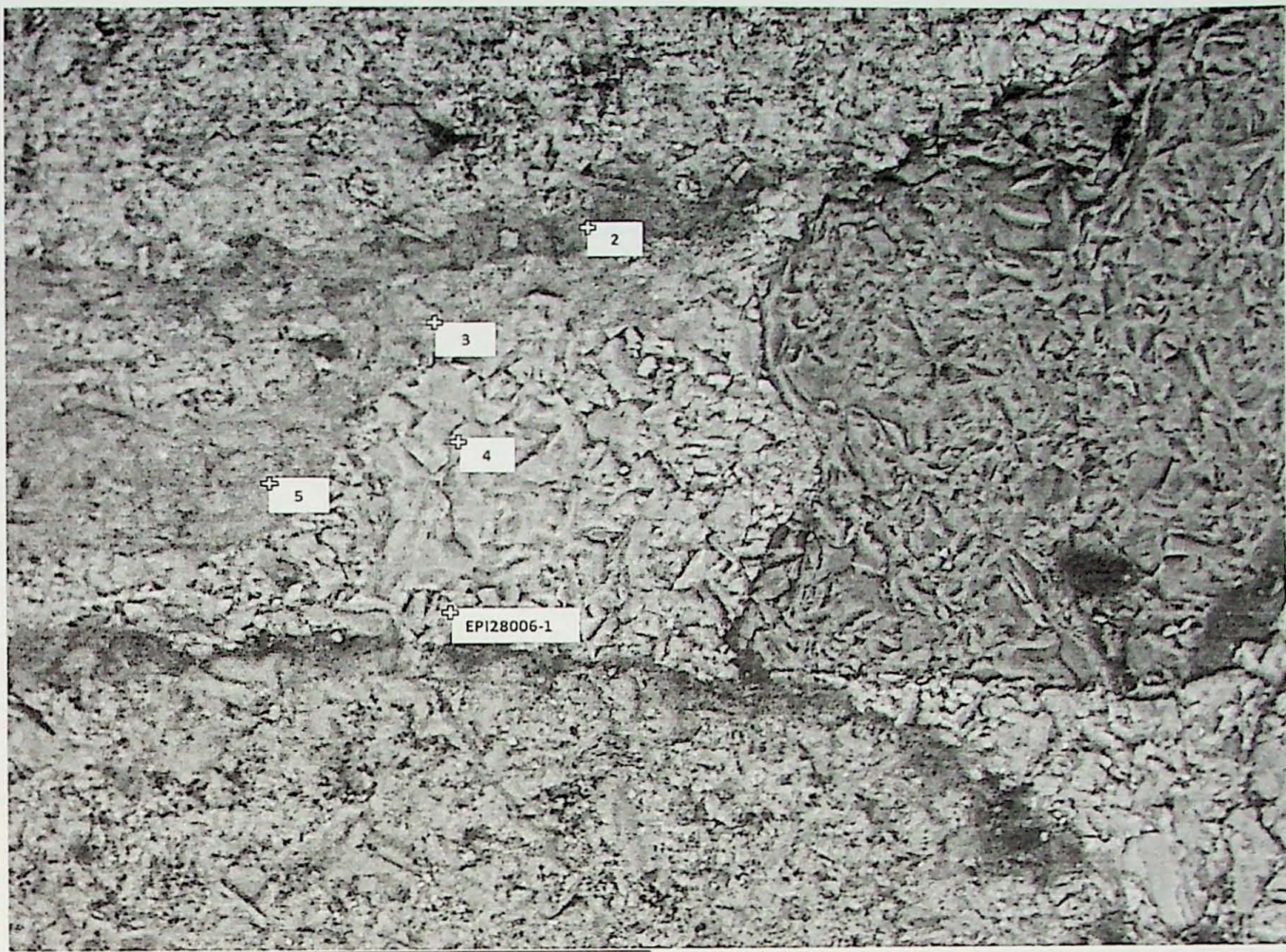
APÊNDICE C

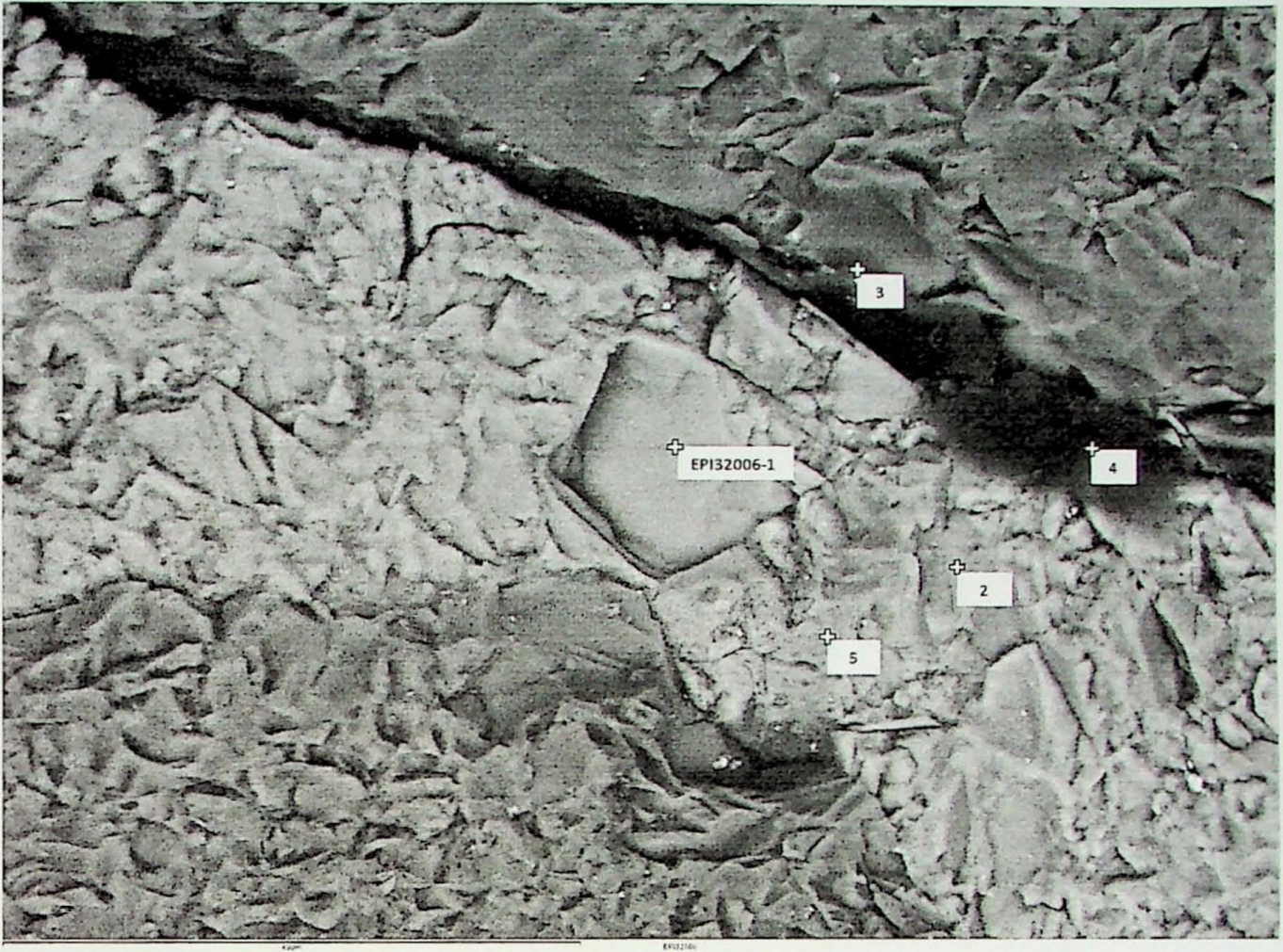
**Resultados de análises por MEV-EED
(*SEM-EDS*)**

APÊNDICE C – Resultados de análises por MEV-EED (SEM-EDS)

1. Valores em % em massa (wt%); 2. Proporções em mol % (recalculadas para 100%). A – alga vermelha em contato com o cimento); B – borda (da alga vermelha em contato com o cimento); C – cimento carbonatado

[illegible]

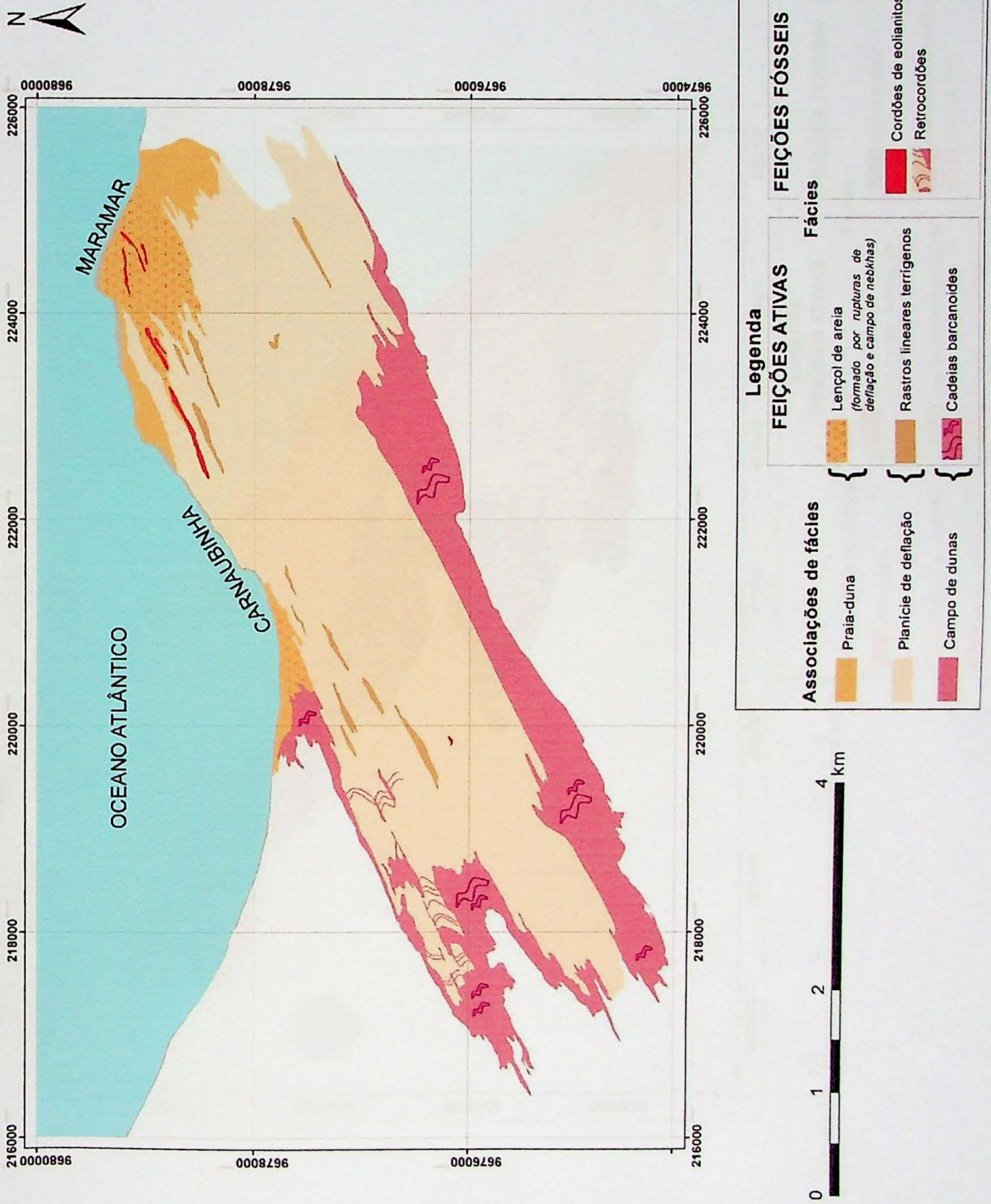




APÊNDICE D

Mapas de fácies morfológicas

APÊNDICE D - MAPA DE FÁCIES MORFOLÓGICAS DE CARNAUBINHA-MARAMAR, LUÍS CORREIA (PI)



APÊNDICE D - MAPA DE FÁCIES MORFOLÓGICAS DE IMBOACA-GUAJIRU, TRAIRI (CE)

