



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

MARÍLIA DE SOUZA MENEZES

ESTUDO DA ALTERAÇÃO EODIAGENÉTICA EM GRÃOS DETRÍTICOS DE DEPÓSITOS
EÓLICOS QUATERNÁRIOS DO PORTO DO PECÉM (SÃO GONÇALO DO AMARANTE E
CAUCAIA, CE)

FORTALEZA-CE

2018

MARÍLIA DE SOUZA MENEZES

ESTUDO DA ALTERAÇÃO EODIAGENÉTICA EM GRÃOS DETRÍTICOS DE DEPÓSITOS
EÓLICOS QUATERNÁRIOS DO PORTO DO PECÉM (SÃO GONÇALO DO AMARANTE E
CAUCAIA, CE)

Relatório de Graduação apresentado ao Curso de
Geologia do Departamento de Geologia da
Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues do
Nascimento Jr.

FORTALEZA-CE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M512e Menezes, Marília de Souza.

Estudo da alteração eodiagenética em grãos detríticos de depósitos eólicos quaternários do porto do Pecém (São Gonçalo do Amarante e Caucaia, CE) / Marília de Souza Menezes. – 2018.
44 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geologia, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Júnior.

1. Eodiagênese. 2. Bioclastos. 3. Minerais pesados. 4. Porto do Pecém. I. Título.

CDD 551

MARÍLIA DE SOUZA MENEZES

Relatório de Graduação apresentado ao Curso de
Geologia do Departamento de Geologia da
Universidade Federal do Ceará.

Aprovado em: __/__/__.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Junior (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Wellington Ferreira da Silva Filho

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Satânder Sá Freire

Universidade Federal do Ceará (UFC)

FORTALEZA

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas Anny Rocha, Ian Cerdeira, Gabriel Aguiar e Cláudio Ângelo pelo auxílio na coleta e tratamento das amostras.

Agradeço ao Professor Daniel Rodrigues do Nascimento Junior pela orientação e paciência D:

Agradeço a Carla Costa, Ana Flávia Cavalcante, tantos amigos e conhecidos que fizeram companhia nos dias bons e ruins. Eu sou o oceano pacífico. Obrigada <3

Agradeço ao CNPq pela bolsa de graduação sanduíche na Queensland University of Technology, Brisbane, Austrália. Sou muito grata a Universidade Federal do Ceará por todas as oportunidades e aprendizados que tive no decorrer de minha vida acadêmica.

Agradeço a minha família, meu irmão Carlos Alberto de Souza Menezes por sempre me ajudar nos estudos, minha irmã Mariana de Edvirgens de Souza Menezes e aos meus Pais, Luiz Carlos Braga Menezes e Maria de Jesus de Souza Rodrigues, por todo carinho e suporte, vocês foram e são primordiais nessa jornada. Amo vocês!

Agradeço também ao Pedro Santos Souza, obrigada pelo suporte, você é muito especial!

Vai dar certo... o/

RESUMO

Os processos eodiagnéticos são os primeiros a afetar depósitos sedimentares ainda pouco soterrados, podendo impor modificações químicas iniciais sobre partículas detríticas. Na região do Porto do Pecém (litoral oeste cearense) ocorrem depósitos eólicos quaternários de diferentes gerações e possivelmente afetados por diferentes processos que permitem testar tanto sua influência mútua como aquela estritamente relacionada às partículas detríticas de cada depósito.

Este trabalho avaliou as condições eodiagnéticas sofridas pelos depósitos eólicos do Porto do Pecém através de sua influência sobre a assembleia detrítica quimicamente mais instável: minerais pesados e bioclastos. Para isso, foram coletadas amostras de areia nos diferentes depósitos e em seus horizontes de solo, a partir das quais os bioclastos foram estudados à lupa binocular e os minerais pesados por microscopia de luz polarizada. O resultado geral foi avaliado por técnicas estatísticas de regressão linear e análise de componentes principais.

A análise à lupa binocular apresentou a presença de bioclastos carbonáticos e minerais pesados. Os minerais com maiores correlações foram hornblenda marrom e verde, cianita e alterita. O resultado geral apontou a existência de uma assembleia mineralógica favorável a análise da alteração eodiagnética. Com isso, o presente relatório busca avaliar as similaridades e/ou diferenças nas alterações eodiagnéticas sobre as partículas detríticas dos depósitos eólicos e suas causas mais plausíveis. Este trabalho possui assim potencial no auxílio da compreensão dos diferentes mecanismos de alteração química que tem levado à formação e diferenciação das gerações de dunas no litoral oeste cearense.

PALAVRAS-CHAVE: Eodiagnese, Bioclastos, Minerais Pesados, Porto do Pecém.

ABSTRACT

Eodiagenetic processes are the first to affect sedimentary deposits still barely buried, which can impose initial chemical modifications under detritical particles. At the Port of Pecém region (in the Cearense west coast) quaternary aeolian deposits occur from different generations and possibly affected by different processes which allow to test both the mutual influence of the same processes and that strictly related to the detritical particles from each deposit.

This work aims to evaluate the eodiagenetic conditions affected by the aeolian deposits from the Port of Pecém through its influence under the detritical assemblage chemically more unstable: heavy minerals and bioclasts. Therein, sand samples are going to be collected in the different deposits and in their different soil horizons from which the bioclasts are going to be studied under magnifying glass microscope and the heavy minerals under polarized light microscope. The results from the heavy minerals analysis is going to be examined by chemical alteration indexes made by pairs of index minerals. The overall result will be assessed by statistical techniques such as linear regression and principal component analysis.

The analysis under magnifying glass microscope presented carbonate bioclasts and heavy minerals. Honblende, kyanite and alterite are the minerals with the highest correlations. The general result pointed the existence of a mineral assemblage favorable to the analysis of the eodiagenetic alteration. Forthwith, the present report seeks to appraise the similarities and/or differences in the eodiagenetic alterations over the detritical particles from the aeolian deposits and their most plausible causes. Therefore, this work has the potential to assist in the comprehension of the different mechanisms of chemical alteration which have led to the formation and contrast of the dunes generation in the Cearense west coast.

KEYWORDS: Eodiagenesis, Bioclasts, Heavy Minerals, Port of Pecém.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

- Figura 1. Visão geral dos quatro grupos principais de feições eólicas na região do Porto do Pecém, entre os municípios de São Gonçalo do Amarante (a oeste) e Caucaia (a leste).....13
- Figura 2. Mapa geológico da região de estudo, MOURA, 2014.....16
- Figura 3: Perfil vertical exposto de um dos eolianitos da região do Pecém (coordenadas: 3°33'41”S/38°48'10”W). No quadro amarelo, detalhe das estruturas internas proeminentes (estratificações plano-paralelas).....18
- Figura 4. Nível topográfico Geodetic NDS 32X utilizado para a construção do perfil topográfico da praia ao interior do campo de dunas.....19
- Figura 5: Feições eólicas do perfil SE-NW do Porto do Pecém. A – lençóis de areia eólica em meio à planície de deflação (visão de sotavento); B – lobo deposicional de duna parabólica (notar o ganho de elevação e as paredes vegetadas, visão de barlavento); C – empoçamentos de água do freático vadoso exposto na planície de deflação; D – Monte residual em meio ao campo de dunas parabólicas ativo; E, F – porções fragmentadas de um dos eolianitos rebatidos no perfil topográfico do campo de dunas (portador da amostra PEC15).....23
- Figura 6. Perfil dos sistemas costeiros alinhados na direção do vento efetivo da região do Pecém a partir da praia. Amostras posicionadas de acordo com sua distância relativa à linha de costa (sua numeração refere-se apenas à ordem de coleta no trabalho de campo).....25
- Figura 7. Valores percentuais médios de componentes terrígenos (quartzo, feldspato, laterita e opacos) e bioclastos (carbonáticos e vegetais) identificados à lupa binocular nas areias eólicas do Porto do Pecém.....26
- Figura 8. Fotos de grãos à lupa binocular de amostras selecionadas. Grãos de quartzo apresentam alta porcentagem em todas as amostras, seguido por feldspatos, opacos e bioclastos, além de restos vegetais (galhos e raízes). Símbolos: QZ – quartzo ou minerais transparentes indistintos; OPA – minerais opacos indistintos; FELD – feldspatos; LAT – fragmentos de laterita; BIO-C – bioclastos carbonáticos; BIO-V – bioclastos vegetais.....27

Figura 9. Distribuição horizontal de feldspatos e bioclastos carbonáticos identificados à lupa binocular.....	28
Figura 10. Distribuição vertical de feldspatos identificados à lupa binocular nas amostras PEC10 e PEC14. No final dos símbolos, as letras T, M e B referem-se respectivamente a topo, meio e base nos perfis de neossolo quartzarênico.....	29
Figura 11. Gráfico de barras de comparação frequência de contagem média dos minerais pesados mais abundantes. Siglas: HBV - hornblenda verde; HBM – hornblenda marrom; AND – andaluzita; CIA – cianita; SIL – silimanita; EST – estauroлита; EPI – epidoto; TIT – titanita; ZIR – zircão; TUR – turmalina marrom; RUT – rutilo; ALT – alterita.....	30
Figura 12. Fotomicrografias dos principais minerais pesados presentes nas amostras identificados com auxílio de microscópio de luz polarizada. À esquerda, com nicóis paralelos e à direita, com nicóis cruzados. Siglas: HBV-Hornblenda Verde; ZOI-Zoisita; TUR-Turmalina; FIB-Fibrolita; EST-Estauroлита; ALT-Alterita; SIL-Silimanita; TIT-Titanita; AND-Andaluzita; ZIR-Zircão; RUT-Rutilo; CIA-Cianita; EPI-Epidoto.....	31
Figura 13: Matriz de correlação linear dos minerais pesados mais comuns com índices de significância de $r > +0,6$ (ou $< -0,6$: correlação negativa) e $p < 0,01$ destacados em negrito. Símbolos: HBV – hornblenda verde; HBM – hornblenda marrom; AND – andaluzita; CIA – cianita; SIL – silimanita; EST – estauroлита; EPI – epidoto; TIT – titanita; ZIR – zircão; TUR – turmalina marrom (schorlítica); RUT – rutilo; ALT – alterita.....	32
Figura 14: Gráfico biplot de escores (amostras: pontos) e pesos (minerais: vetores) onde os dois primeiros componentes da contagem de minerais pesados de todas as amostras são utilizados. Siglas de minerais: HBM – hornblenda marrom; HBV – hornblenda verde; AND – andaluzita; RUT – rutilo; EPI – epidoto; ZIR – zircão; EST – estauroлита; TIT – titanita; TUR – turmalina marrom; CIA – cianita.....	36
Figura 15: Em A, gráfico de distribuição horizontal e vertical dos dados de minerais pesados de todas as quinze amostras superficiais. Nos gráficos B e C, as amostras PEC10 e PEC14 são exibidas de acordo com a variação de minerais pesados ao longo de seu perfil vertical.....	38

Tabela 1: Componentes principais (PC), valores próprios (eigenvalue), percentagem da variância (% variance) e percentagem de variância acumulada (% var acum) dos primeiros cinco componentes com percentagem de variância acima de 5%.....34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. FISIOGRAFIA E GEOLOGIA REGIONAL.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	17
3.2. ATIVIDADES DE CAMPO.....	17
3.3. ATIVIDADES LABORATORIAIS.....	19
3.3.1. ESTUDO DE BIOCLASTOS À LUPA BINOCULAR.....	19
3.3.2. MONTAGEM DE LÂMINAS DE MINERAIS.....	20
3.3.3. PETROGRAFIA DE MINERAIS PESADOS.....	20
3.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS: REGRESSÃO LINEAR E COMPONENTES PRINCIPAIS.....	21
3.4.1. CORRELAÇÃO LINEAR E VALOR E VALOR P.....	21
3.4.2. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP).....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1. MORFOLOGIA GERAL DO SISTEMA EÓLICO E ASSOCIADO.....	22
4.2. ANÁLISE À LUPA BINOCULAR.....	26
4.3. IDENTIFICAÇÃO E CONTAGEM DE MINERAIS PESADOS.....	29
4.4. MATRIZ DE CORRELAÇÃO.....	32
4.5. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	34
4.6. DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DOS DADOS DE MINERAIS PESADOS.....	37
5. CONCLUSÕES.....	40
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	42
APÊNDICE.....	44

1. INTRODUÇÃO

A diagênese corresponde a um conjunto de processos de alteração física e química dos sedimentos que, em última instância, culmina com a formação das rochas sedimentares (PETTIJOHN, 1975). A diagênese se inicia logo após o soterramento dos grãos detríticos abaixo da superfície ou interface deposicional; neste contexto raso, ainda pouco soterrado (desde os primeiros decímetros até poucas centenas de metros) e por vezes influenciado pelo intemperismo e por águas vadasa, ela é chamada eodiagênese (BOGGS, 2009). Em termos gerais, os principais processos diagenéticos são compactação, dissolução, cimentação e recristalização (FRIEDMAN; SANDERS, 1978; GIANNINI; RICCOMINI, 2000; BOGGS, 2009). A importância de cada processo dependerá do grau de soterramento sofrido até então e do tipo de componentes presentes no sedimento (principalmente carbonáticos e terrígenos, e sua proporção relativa) (GIANNINI; RICCOMINI, 2000; FOLK, 1980).

Na região do Porto do Pecém, entre os municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, litoral oeste do Ceará, ocorre depósitos eólicos quaternários de diferentes gerações (HESP *et al.*, 2009; MOURA, 2014), com destaque para dunas frontais, campos de dunas ativos, dunas estabilizadas pela vegetação e, em meio às planícies de deflação recentes, eolianitos (Figura 1). Em particular, os eolianitos do Porto do Pecém se destacam na paisagem através de feições ruiformes (*yardangs*) produzidas por erosão sobre antigas dunas ligeiramente cimentadas em carbonato de cálcio. Este tipo de cimentação precoce em dunas costeiras pode favorecer-se da presença de bioclastos carbonáticos em meio aos componentes detríticos das dunas e de condições ácidas das águas meteóricas e vadasas locais (MOURA, 2014). Por outro lado, embora formado a expensas de bioclastos, outros componentes detríticos dos eolianitos, como os minerais pesados, podem ter sua preservação garantida pelo processo anterior na dependência de seus tipos, tempo de residência e velocidade e amplitude da cimentação carbonática.

Figura 1. Visão geral dos quatro grupos principais de feições eólicas na região do Porto do Pecém, entre os municípios de São Gonçalo do Amarante (a oeste) e Caucaia (a leste).



A cimentação dos eolianitos não é o único fator eodiagenético químico sobre os depósitos eólicos do Porto do Pecém. Em outros locais, especialmente em dunas estabilizadas pela vegetação, há perfis de solo bem desenvolvidos, classificados como neossolos quartzarênicos (IPECE, 2007; MOURA, 2014). Neossolos quartzarênicos são desprovidos de contato lítico até 0,5 m de profundidade e com textura arenosa em todos os horizontes até 1,5 m de profundidade (EMBRAPA, 2006). Nesses solos, apesar da franca abundância em quartzo, componentes quimicamente menos estáveis podem ocorrer em menor volume, como os minerais pesados e até mesmo bioclastos trazidos das praias. Com isso, a diferença mineralógica entre os componentes detríticos existentes nos diferentes horizontes do solo pode ser testada, inclusive, em comparação aos mesmos componentes presentes em níveis cimentados nos eolianitos e nas dunas ativas recentes. Isso permite avaliar quais fatores eodiagenéticos de origem química agiram no intervalo de tempo considerado, sua extensão e as relações mútuas entre os mesmos nos depósitos considerados.

A composição das assembleias de minerais pesados pode ser bastante influenciada por processos operando durante transporte, deposição e diagênese (MORTON, 1993), fazendo com que sua assembleia final não seja reflexo fiel da fonte material do sedimento. Tendo isso em mente, Morton & Hallsworth (1994, 1999) criaram índices de pares de minerais potencialmente capazes de contornar problemas advindos desses fatores. Como proveniência, transporte e alteração química são os três fatores principais responsáveis pela assembleia final de minerais pesados, o índice requer escolher dois minerais que possuam mais ou menos as mesmas características em dois desses fatores (ou que sofram mais ou menos os mesmos efeitos) e ao mesmo tempo grandes diferenças num terceiro fator. Por exemplo, no caso de estudo voltado para a alteração química eodiagenética, que tipicamente ocorre em condições ácidas superficiais, os minerais escolhidos teriam de ter a mesma fonte potencial, as mesmas características hidrodinâmicas (tamanho, densidade e forma) porém diferentes resistências químicas às condições do intemperismo.

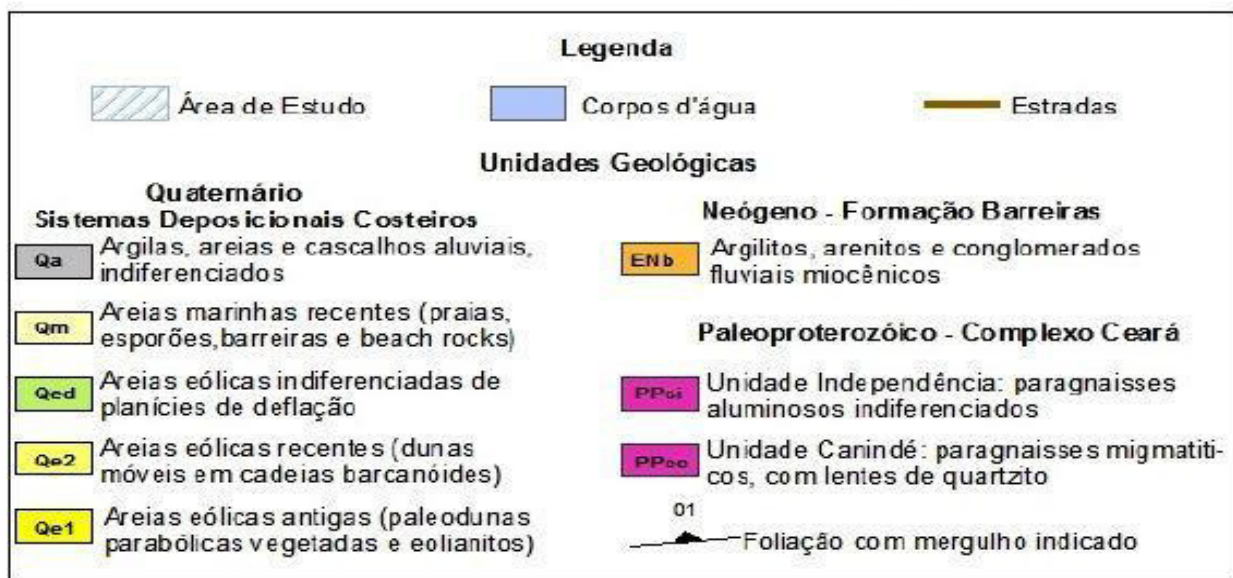
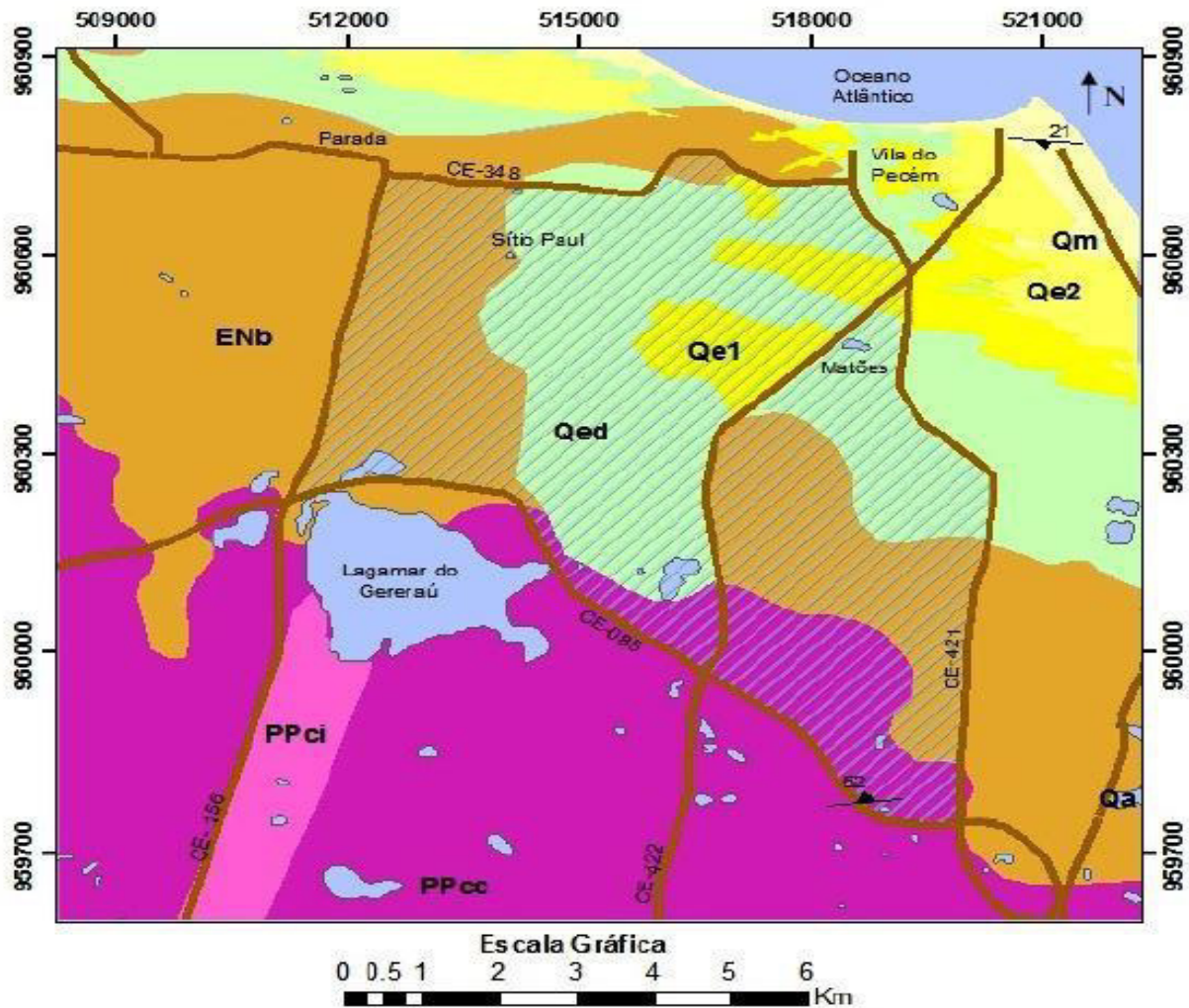
2. FISIOGRAFIA E GEOLOGIA REGIONAL

A área em estudo localiza-se entre os municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, porção central do litoral cearense, com uma distância de aproximadamente 50km em relação à capital Fortaleza. Na região do Pecém prevalece o clima quente estável com temperaturas elevadas (média de 26°C), porém com baixa amplitude e alta evaporação (2300 mm/ano). De acordo com dados da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME, 2009) a faixa média pluviométrica da região possui uma distribuição espacial e temporal irregular, ultrapassando a faixa média de 1000 mm/ano.

Localmente, a geologia da região de São Gonçalo do Amarante abrange três grupos principais: Complexo Ceará, Formação Barreiras e Sistemas Depositionais Costeiros (MOURA, 2014) (Figura 2). O Complexo Ceará seria representado quase exclusivamente por paragneisses eventualmente migmatíticos e lentes de quartzitos das unidades Independência e Canindé (CAVALCANTE *et al.*, 2003), inclusive no litoral (MOURA, 2014). A Formação Barreiras abrange tabuleiros constituídos de argilitos, arenitos e conglomerados de diversas tonalidades e com um nível fortemente laterizado em ferro (ALHEIROS *et al.*, 1988). Ocorrem afloramentos escassos desta formação junto às estradas principais, mas a maior parte da unidade encontra-se coberta por depósitos quaternários dos Sistemas Depositionais Costeiros (MOURA, 2014).

Os Sistemas Depositionais Costeiros incluem depósitos marinhos, eólicos e aluviais de idade quaternária que em parte recobrem as unidades mais antigas (CAVALCANTE *et al.*, 2003; MOURA, 2014). Os depósitos marinhos incluem tanto as areias praias quartzosas recentes como depósitos mais antigos consolidados, cimentados em carbonato de cálcio (*beach rocks*), em pontos isolados, geralmente como blocos fendidos (MOURA, 2014). Depósitos aluviais indiferenciados ocorrem na forma de argilas, areias e cascalhos com matéria orgânica vegetal associada, especialmente em canais de pequeno porte com variável influência de marés (CAVALCANTE *et al.*, 2003; MOURA, 2014). Por fim, os depósitos eólicos são formados por areias recentes bem-selecionadas, quartzosas, distribuídas desde paleodunas parabólicas hoje fixadas pela vegetação como dunas recentes em cadeias barcanóides (MOURA, 2014). As paleodunas possuem desenvolvimento de neossolos quartzarênicos. As dunas móveis recentes possuem ainda variável conteúdo bioclástico marinho, e corpos isolados cimentados em carbonato de cálcio e portadores de rizoconcreções, classificáveis como eolianitos (MOURA, 2014).

Figura 2. Mapa geológico da região de estudo, MOURA, 2014.



3. MATERIAIS E MÉTODOS

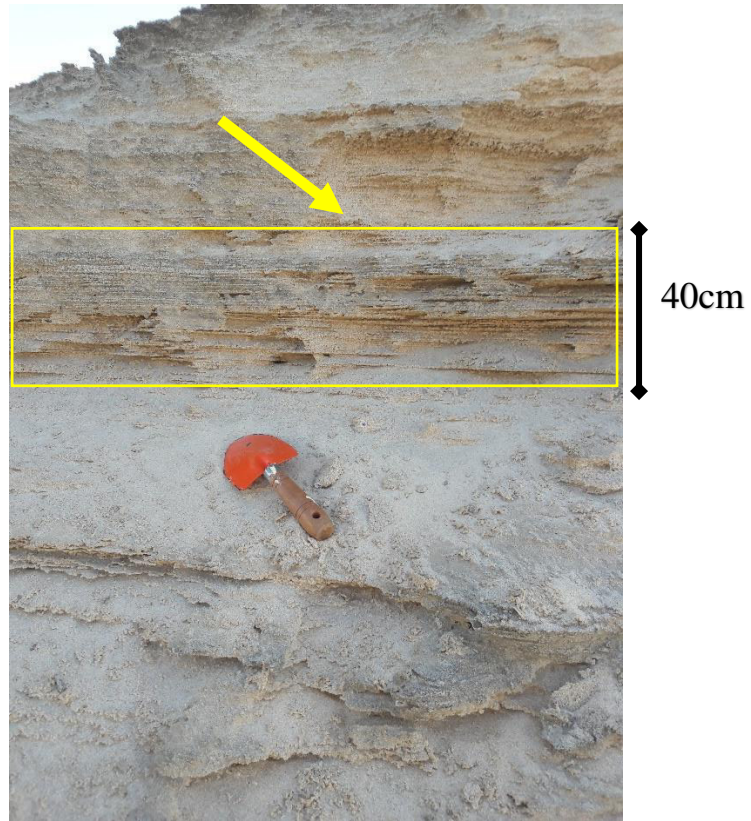
3.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico teve foco em compêndios acerca das análises laboratoriais empregadas, especialmente o preparo, análise e interpretação de minerais pesados como indicadores de alteração química. Secundariamente, publicações sobre componentes detríticos das areias de eólicas ora estudados na região do Porto do Pecém, incluindo suas características, áreas de ocorrência e interpretações também foram contemplados no levantamento bibliográfico.

3.2. ATIVIDADES DE CAMPO

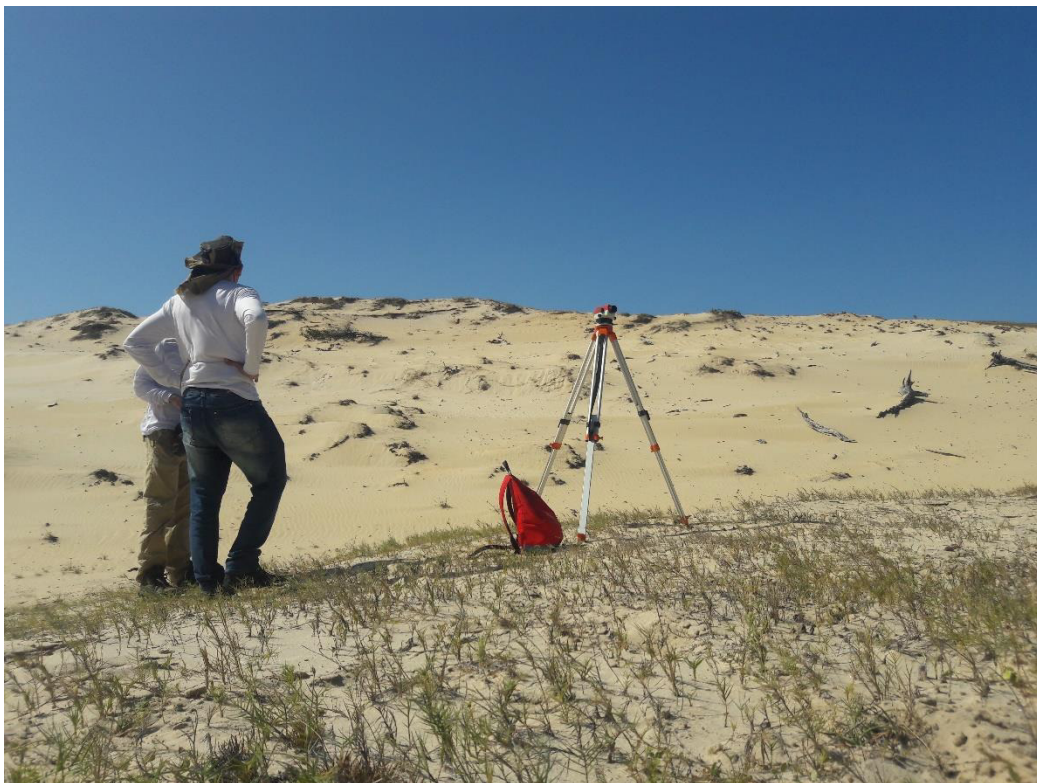
Os alvos para a atividade de campo foram locais de ocorrência dos diferentes tipos de depósitos eólicos na região do Porto do Pecém e arredores, preferencialmente próximos ou alinhados na direção de seu vento efetivo a partir da zona costeira. Para tanto, foram consultadas fontes de mapeamento sistemático na região, incluindo aqueles realizados por ocasião da construção do Porto do Pecém. Além de depósitos eólicos recentes e antigos (paleodunas, eolianitos), os alvos incluíram a praia adjacente (fonte secundária, imediata das dunas recentes) e perfis verticais de solos nos depósitos antigos (Figura 3).

Figura 3: Perfil vertical exposto de um dos eolianitos da região do Pecém (coordenadas: 3°33'41''S/38°48'10''W). No quadro amarelo, detalhe das estruturas internas proeminentes (estratificações plano-paralelas).



Uma vez detectados, os alvos foram georreferenciados por meio de GPS e topograficamente perfilados desde a praia com uso de nível topográfico Geodetic NDS 32X (Figura 4) com régua (mira) de alumínio. Associado ao perfil topográfico, o reconhecimento das diferentes morfologias e depósitos foi feito e registrado por fotografias e em caderneta de campo. Amostras de areias dos diferentes tipos de depósitos e de seus diferentes horizontes de solo ora desenvolvidos foram coletadas para análise de seus componentes detríticos em laboratório.

Figura 4. Nível topográfico Geodetic NDS 32X utilizado para a construção do perfil topográfico da praia ao interior do campo de dunas.



3.3. ATIVIDADES LABORATORIAIS

3.3.1. ESTUDO DE BIOCLASTOS À LUPA BINOCULAR

Para análise de bioclastos à lupa binocular a alíquota usada foi de aproximadamente 10 g de amostra bruta de areia, espalhada sobre placas de Petri. Fragmentos de conchas de moluscos e outros restos esqueléticos de animais marinhos foram semi-quantificados e, sempre que possível, identificados. Para tanto, a observação foi feita em dez diferentes quadrantes escolhidos aleatoriamente em um campo de visão com aumento de 20X. Especial atenção foi dada às feições

indicativas de alteração intempérica sobre os bioclastos. Da mesma forma, apesar de não ser o alvo principal nesta técnica, componentes detríticos minerais maiores também foram identificados e semi-quantificados sempre que possível.

3.3.2. MONTAGEM DE LÂMINAS DE MINERAIS PESADOS

Uma alíquota de cada amostra de areia (de 300 a 500 g) foi analisada especificamente para minerais pesados transparentes por petrografia. Antes disso, as alíquotas foram previamente desagregadas em laboratório com auxílio de almofariz de porcelana e pistilo de ponta macia (emborrachada), tomando-se o cuidado para não fragmentar os grãos. Cada amostra foi submetida à concentração densimétrica de seu teor em minerais pesados por meio de separação ao bromofórmio (CHBr_3 ; densidade $\approx 2,85 \text{ g/cm}^3$).

Para separação ao bromofórmio, as amostras foram previamente concentradas em uma fração granulométrica ideal de ocorrência entre 0,062 e 0,125 mm de diâmetro dos grãos (areia muito fina) (PETTIJOHN, 1975). Isso foi feito por meio de peneiras montadas sobre agitador mecânico, que operou por cerca de 10 minutos. As peneiras usadas abrangeram os dois intervalos de classe granulométrica citados, incluído fundo para recolhimento de material residual mais fino.

Um sistema de funis de vidro em torre sobre um erlenmeyer, com estágio superior isolado por grampo de Mohr de látex, foi usado para separar as frações por densidade via afundamento (pesada) e flutuação (leve). As subalíquotas recolhidas foram identificadas e submetidas à secagem em capela por um dia. Após isso, a fração pesada foi submetida à separação de minerais pesados magnéticos ora existentes por meio de imã comum de bolso envolto em plástico, para gerar aumento relativo de minerais pesados transparentes em relação a opacos. Por fim, cada fração de minerais pesados não-magnéticos foi impregnada com bálsamo do Canadá sintético sobre lâminas de vidro não aquecidas, seguida de mistura com o meio de imersão e montagem final por pressão e colagem manual de uma lamínula.

3.3.3. PETROGRAFIA DE MINERAIS PESADOS

As lâminas petrográficas produzidas na etapa anterior foram destinadas à identificação e contagem de minerais pesados transparentes ao microscópio de luz polarizada de marca Olympus BX41. Fotomicrografias com escala foram adquiridas para os espécimes mais típicos de minerais.

Técnicas comuns de microscopia foram aplicadas na identificação (KERR, 1959; FUJIMORI; FERREIRA, 1979; TROGGER, 1979), com pequenas adaptações relacionadas à espessura dos grãos (MANGE; MAUER, 1992). A contagem foi feita pelo “método das faixas” (*ribbon counting*; GALEHOUSE, 1971), onde são traçadas linhas-guias com caneta “hidrocor” na parte traseira da lâmina, através das quais os minerais foram identificados e computados.

3.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS SOBRE OS MINERAIS PESADOS: REGRESSÃO LINEAR E COMPONENTES PRINCIPAIS

3.4.1. CORRELAÇÃO LINEAR E VALOR P

O resultado bruto da contagem dos minerais pesados mais abundantes foi avaliado por par (X, Y) de variáveis (minerais) através de regressão linear, com uso de coeficiente de correlação r, dado por:

$$r = \frac{[n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)]}{[\sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2}] [\sqrt{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}]},$$

onde n é o número de amostras possuidoras dos minerais X e Y. A avaliação da significância de r foi feita pelo cálculo do valor de força p (*p-value*), com regra de decisão baseado na escolha do valor de p a ser aceito/rejeitado. O valor de p representará o grau de raridade do resultado de r, considerando-se hipótese nula verdadeira. Assim, menores valores de p põem em dúvida a hipótese nula e apoiam a hipótese objeto da pesquisa (WITTE & WITTE, 2005). Como r, neste caso, baseia-se numa distribuição normal de frequências, p corresponde graficamente ao campo (unicaudal) que completaria a curva normal através de valores estimados, não observados (WITTE & WITTE, 2005). Neste estudo, foram admitidos como significantes valores de $r > +0,6$ (ou $< -0,6$: correlação negativa) e $p < 0,01$. Pares de correlação entre várias variáveis (minerais) distribuídas em várias amostras foram representados em matriz de correlação para facilitar o exame visual, através do programa *Minitab™ 15*.

3.4.2. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

O resultado bruto das contagens de minerais pesados também foi avaliado por estatística multivariada, a saber, análise de componentes principais (ACP). A ACP facilita a classificação de conjuntos de dados numerosos (contagem de minerais pesados neste trabalho) e, graficamente,

possibilitou o exame visual das observações (escores ou amostras portadoras das variáveis observadas) em espaço vetorial de elevadas dimensões, o que permitiu ordená-las segundo os aspectos de interesse em torno das variáveis do problema (pesos; neste exemplo, os próprios minerais pesados).

O critério de extração dos componentes foi o da porcentagem de variância (ou variância-covariância), onde foram extraídos a um nível de confiança de 95% ou até que o último componente explicasse 5% ou menos da variância total (HAIR *et al.*, 1998). Os valores gerados pela matriz de dados da ACP são chamados valores próprios (*eigenvalues*), e sua representação gráfica geralmente requer normalização logarítmica. Neste caso, cada eixo gráfico (componente principal ou CP) responde por uma parcela da variância total do conjunto de dados, expressa em porcentagem (% de inércia). No plano bidimensional, pesos podem ser representados por eixos adicionais (eixos-pesos) irradiados a partir da origem comum dos CPs. A inclinação e comprimento dos eixos-pesos reflete sua relação mútua e com os escores: paralelismo, mesmo quando em lados opostos, indica alta correlação (e o oposto também é verdade), e maior comprimento indica maior representatividade (maior força) dos dados. Para realizar a ACP foi usado o programa *Past 1.54* (HAMMER *et al.*, 2001).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. MORFOLOGIA GERAL DO SISTEMA EÓLICO E ASSOCIADO

O perfil examinado no rumo do vento efetivo local (SE-NW) se inicia na praia adjacente, onde o regime morfodinâmico aparente tende ao reflexivo (face praias íngreme e estreita – poucos metros, zona de surf estreita), associado a blocos fendidos em uma laje de *beach rocks* locais. Dunas frontais incipientes (DFI) adjacentes aparecem com pouca vegetação, mas em formas irregulares amalgamadas em terraço e alteradas pela construção da estrada local, e com cotas de até quase 8 m; mais à frente, dão lugar a um cordão de DFI isolado em uma cava e logo após a uma ruptura de deflação, encerrando o complexo das DFIs em uma faixa de aproximadamente 300 m.

Mais a frente, a planície de deflação propriamente dita, em sua porção mais exposta, estende-se por mais de 1 km em terreno bastante aplainado, com vegetação rasteira, pequenas drenagens isoladas, empoçamentos (Figura 5C) e alagadiços (brejo). Eolianitos isolados ocorrem

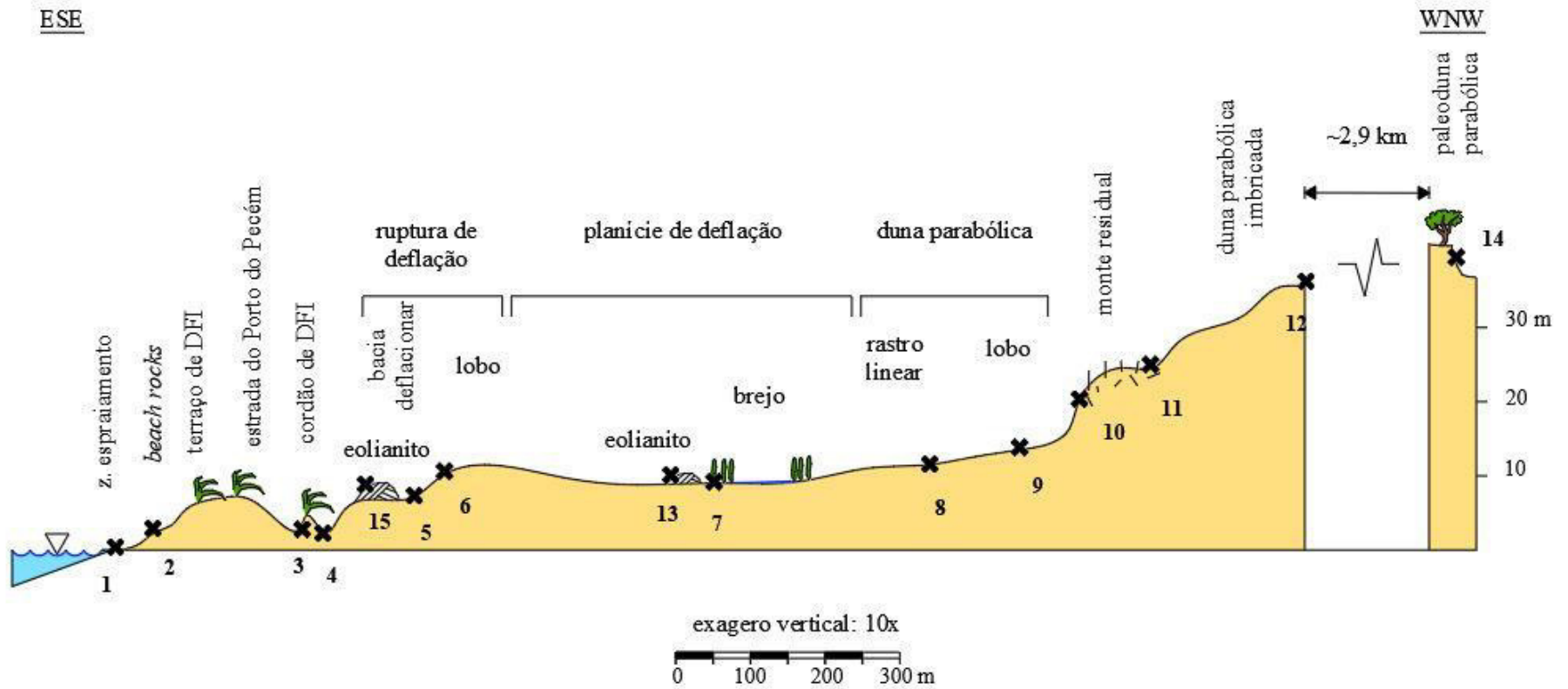
em meio à planície, na forma de montículos ruiformes semi-consolidados, com até poucos metros de altura e presença de fragmentos de rizoconcreções espalhados na superfície (algumas *in situ*) (Figura 5E,F). Um dos eolianitos ainda exhibe estratificações plano-paralelas em um dos flancos. No perfil topográfico estudado, eolianitos das adjacências foram rebatidos em sua posição média (sua visita *in loco* se deu para anotação das características e coleta de amostras). Na planície de deflação também aparecem extensões eólicas de rastros lineares de migração das paredes das dunas parabólicas mais à frente, e seus lençóis de areia associados (ambos testemunhas da migração do campo de dunas) (Figura 5A). Nas dunas parabólicas ativas propriamente ditas, o ganho de elevação no terreno é evidente: cotas atingem quase 20 m em seu lobo deposicional, sem imbricação (Figura 5B). Na porção imbricada mais adiante, o empilhamento eólico resulta em cotas de mais de 20 a mais de 40 m, em extensões que chegam a 2 km; o perfil resumido, no entanto, abrange apenas os dois primeiros quilômetros a partir da praia. Ainda na região imbricada, elevações monticulares isoladas, repletas de vegetação e com evidente solo desenvolvido (montes residuais) ocorrem como testemunhas de antigos corpos eólicos elevados e quase totalmente erodidos (Figura 5D).

Para completar a amostragem, uma parte dissociada do perfil original (contínuo) foi a ele associada. No mesmo alinhamento, cerca de 2,9 km adiante, depósitos de paleodunas parabólicas densamente vegetadas ocorrem com os solos quartzarênicos mais desenvolvidos da região, evidentes pela fácil diferenciação dos horizontes, presença de matéria orgânica vegetal e maior grau de consolidação das areias (Figura 6).

Figura 5: Feições eólicas do perfil SE-NW do Porto do Pecém. A – lençóis de areia eólica em meio à planície de deflação (visão de sotavento); B – lobo deposicional de duna parabólica (notar o ganho de elevação e as paredes vegetadas, visão de barlavento); C – empoçamentos de água do freático vadoso exposto na planície de deflação; D – Monte residual em meio ao campo de dunas parabólicas ativo; E, F – porções fragmentadas de um dos eolianitos rebatidos no perfil topográfico do campo de dunas (portador da amostra PEC15).



Figura 6. Perfil dos sistemas costeiros alinhados na direção do vento efetivo da região do Pecém a partir da praia. Amostras posicionadas de acordo com sua distância relativa à linha de costa (sua numeração refere-se apenas à ordem de coleta no trabalho de campo).



4.2. ANÁLISE À LUPA BINOCULAR

A composição dos componentes terrígenos e bioclastos, representativos de todas as amostras, apresentou alto percentual de quartzo e outros minerais transparentes indistintos (96,9%), seguido por minerais opacos (1,55%), feldspatos (1,31%), bioclastos carbonáticos (fragmentos de conchas, tubos calcários e foraminíferos) (0,09%), fragmentos de laterita (0,05%) e bioclastos vegetais (0,06%) (Figura 7). Os poucos bioclastos carbonáticos encontrados concentram-se em apenas poucas amostras (PEC1, PEC6 e PEC15), todas do início do perfil (SE), mais próximo à fonte imediata (praia). Também as poucas ocorrências de bioclastos vegetais foram achadas em depósitos mais antigos (PEC14: paleodunas vegetada; PEC15: eolianito), sempre como fragmentos de raízes, pondo em xeque até seu caráter detrítico (Figura 8). Os fragmentos lateríticos foram melhor distribuídos, mas sempre em pequena quantidade e são provavelmente derivados de antigo material retrabalhado da Formação Barreiras.

Figura 7. Valores percentuais médios de componentes terrígenos (quartzo, feldspato, laterita e opacos) e bioclastos (carbonáticos e vegetais) identificados à lupa binocular nas areias eólicas do Porto do Pecém.

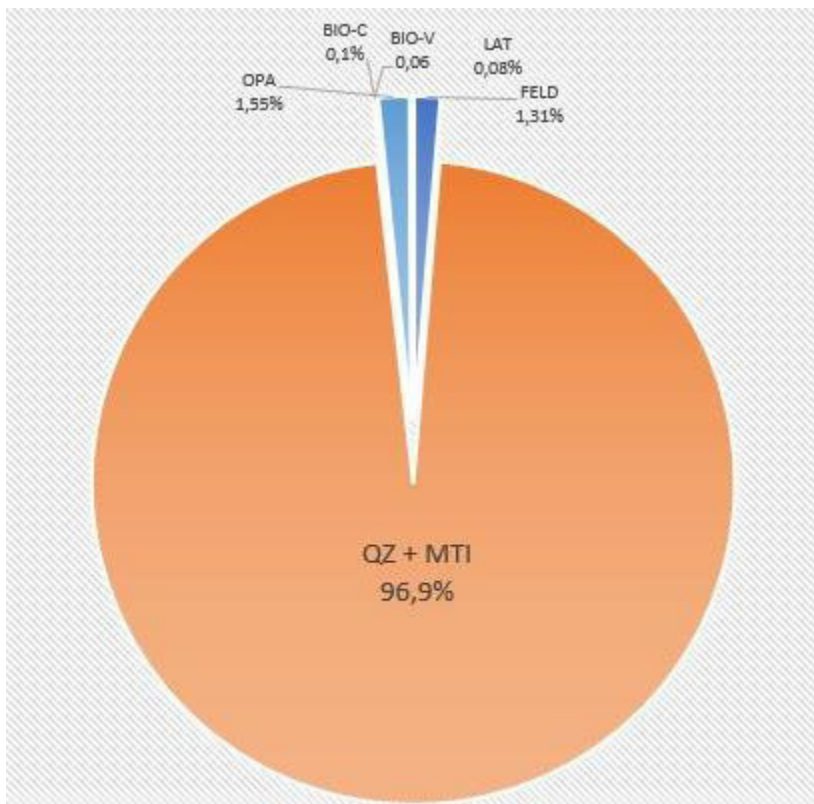
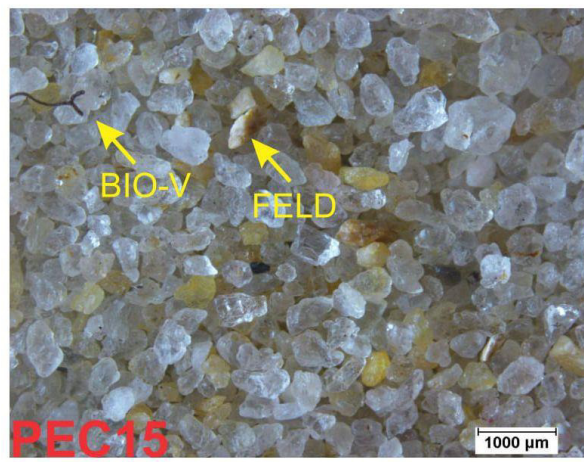
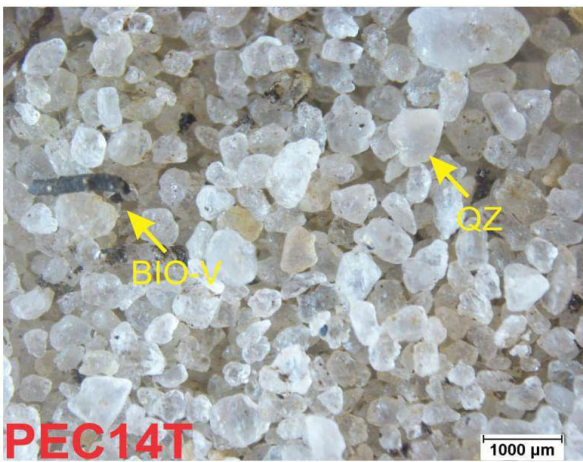
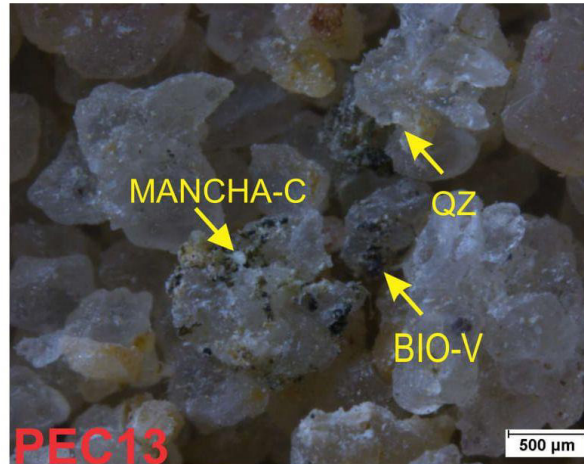
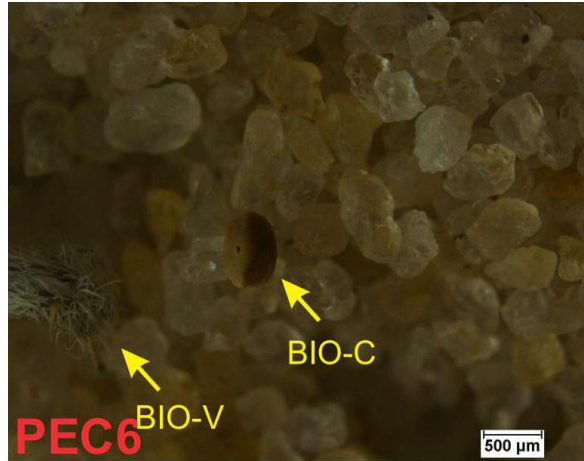
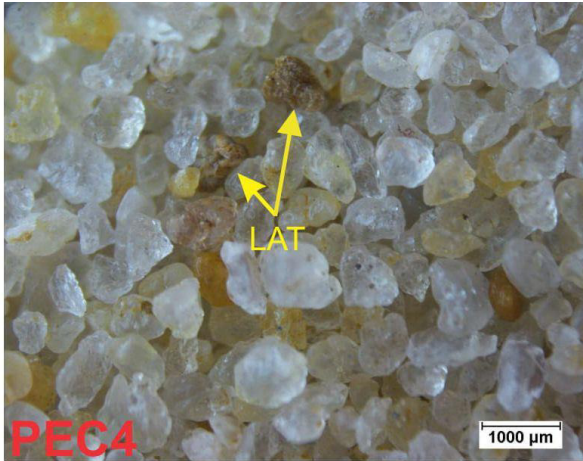
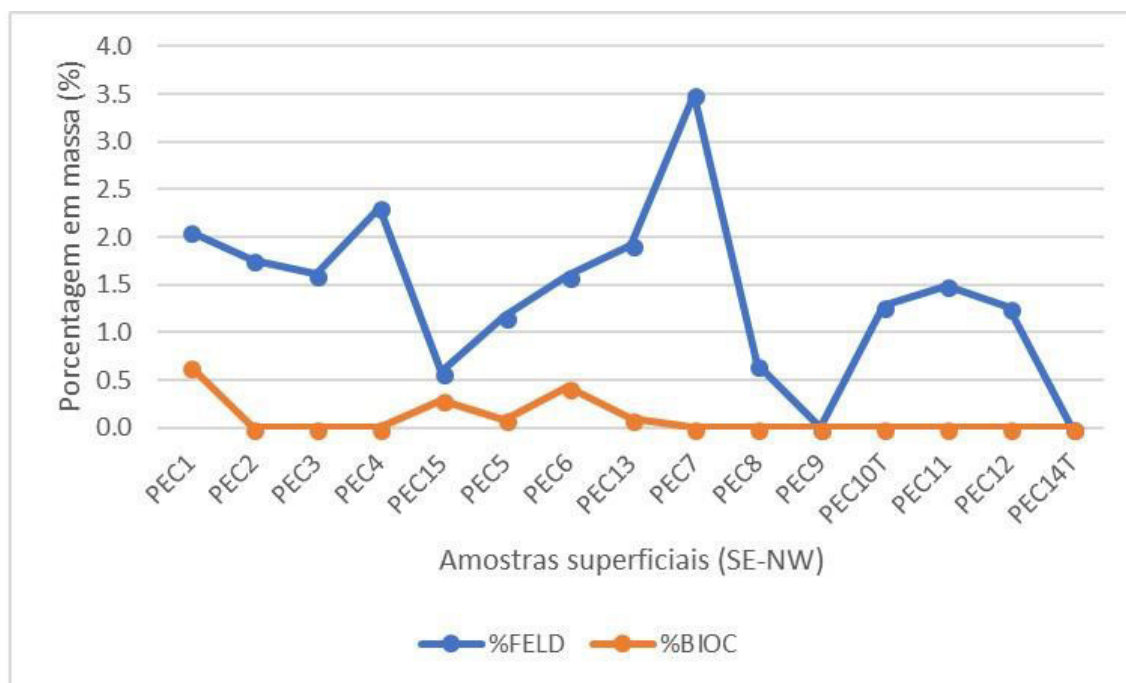


Figura 8. Fotos de grãos à lupa binocular de amostras selecionadas. Grãos de quartzo apresentam alta porcentagem em todas as amostras, seguido por feldspatos, opacos e bioclastos, além de restos vegetais (galhos e raízes). Símbolos: QZ – quartzo ou minerais transparentes indistintos; OPA – minerais opacos indistintos; FELD – feldspatos; LAT – fragmentos de laterita; BIO-C – bioclastos carbonáticos; BIO-V – bioclastos vegetais.



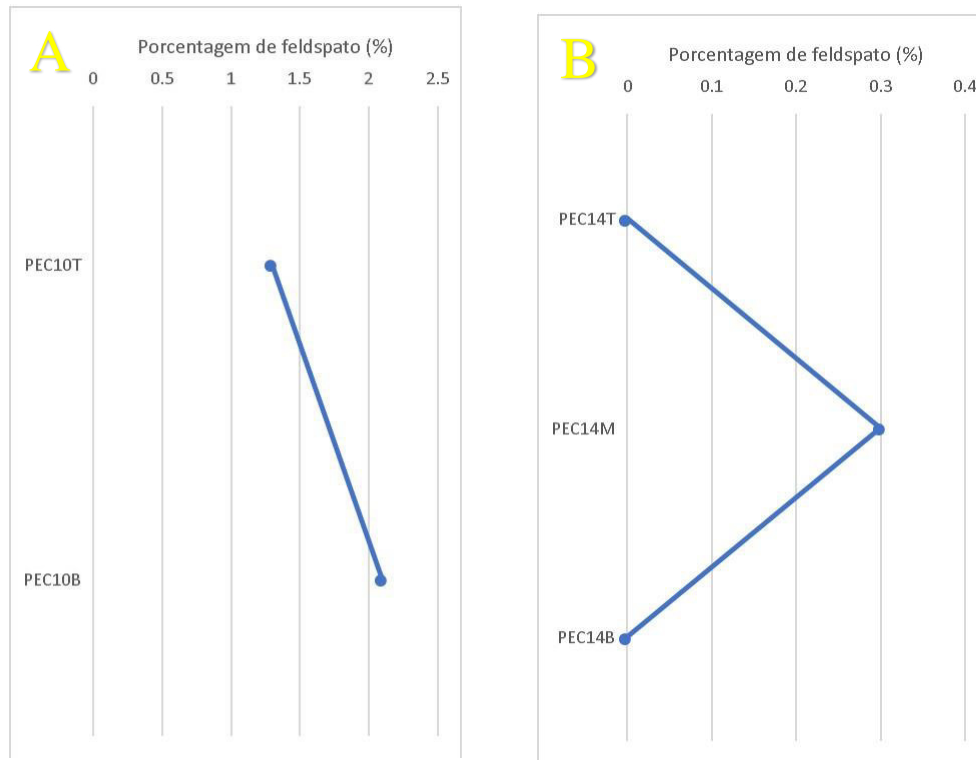
A distribuição horizontal de feldspatos e bioclastos carbonáticos, que são os componentes mais sensíveis à alteração eodiagenética, apresentou-se muito variável, sendo ligeiramente maiores os teores de feldspato em relação aos bioclastos carbonáticos (Figura 9). Em particular, os baixíssimos teores de bioclastos carbonáticos impossibilitam qualquer interpretação desta natureza. Os teores de feldspato, por outro lado, possuem tendência geral de redução campo de dunas adentro, e mostraram-se em geral mais baixos nas amostras de depósitos presumivelmente mais antigos (eolianitos e paleodunas: PEC15 e PEC9).

Figura 9. Distribuição horizontal de feldspatos e bioclastos carbonáticos identificados à lupa binocular.



As amostras PEC10 e PEC14, obtidas de diferentes horizontes em neossolo quartzarênico e analisadas verticalmente, não apresentaram variação significativa em feldspatos (Figura 10). Há redução para cima em PEC10, mas que não é espelhada em PEC14 que, ademais, não apresentou feldspatos nos horizontes da base (eluvial) e do topo (iluvial mais concentrado em cimento). Também, nenhuma das amostras apresentou bioclastos carbonáticos preservados. Nas duas amostras, a irregularidade no teor de feldspatos e a ausência de bioclastos carbonáticos não permite qualquer interpretação vertical sobre a alteração eodiagenética.

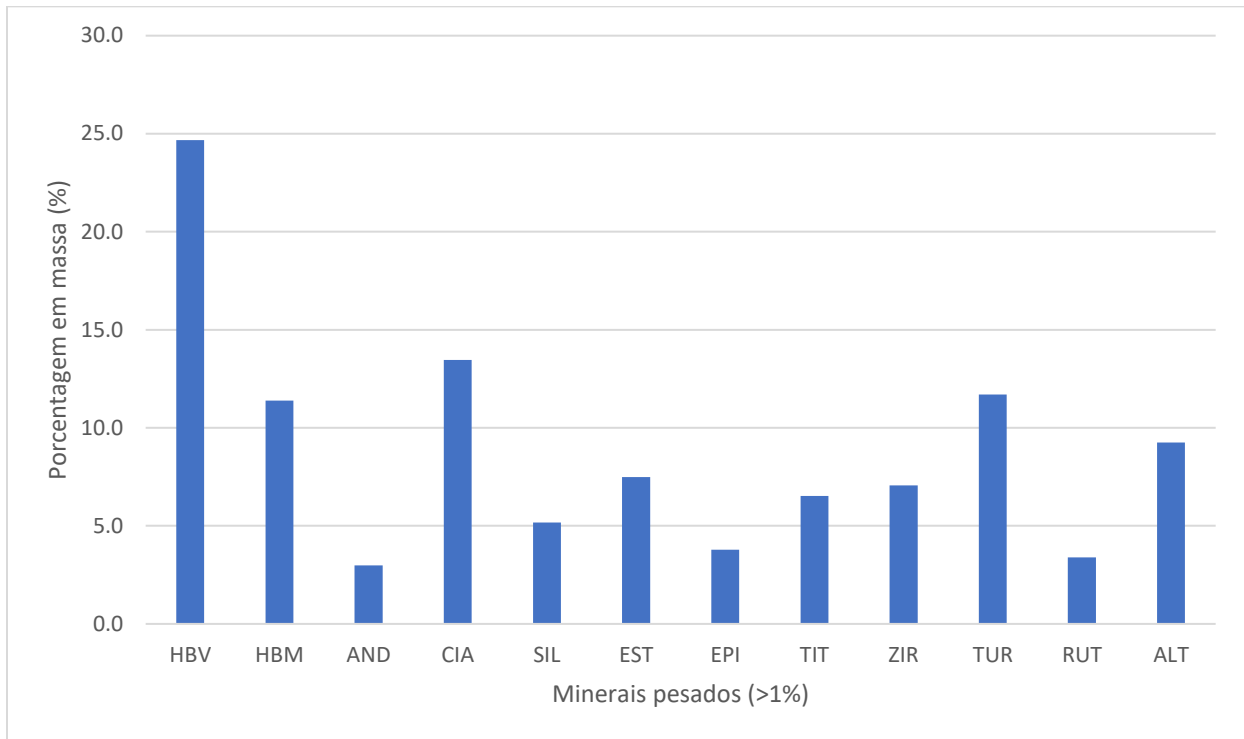
Figura 10. Distribuição vertical de feldspatos identificados à lupa binocular nas amostras PEC10 e PEC14. No final dos símbolos, as letras T, M e B referem-se respectivamente a topo, meio e base nos perfis de neossolo quartzarênico.



4.3. IDENTIFICAÇÃO E CONTAGEM DE MINERAIS PESADOS

A porcentagem média de minerais pesados nas areias foi de 2,7% e, nestes, a porcentagem média de minerais magnéticos foi de 46,6%. A contagem e identificação envolveu mais de 2100 grãos individuais, dos quais em média 15% eram de opacos. Em ordem decrescente, a média geral de minerais pesados transparentes encontrada foi: hornblenda verde (24,7%), cianita (13,5%), turmalina schorlítica (11,7%), hornblenda marrom (11,4%), alterita (9,3%), estauroлита (7,5%), zircão (7,1%), titanita (6,5%), silimanita (5,2%), epidoto (3,8%), rutilo (3,4%), andaluzita (3,0%) (Figura 11). Os minerais traços, com proporções menores que 1% individualmente, foram: tremolita, granada, clinozosita, fibrolita, monazita, coríndon e anatásio.

Figura 11. Gráfico de barras de comparação frequência de contagem média dos minerais pesados mais abundantes. Siglas: HBV - hornblenda verde; HBM – hornblenda marrom; AND – andaluzita; CIA – cianita; SIL – sillimanita; EST – estauroлита; EPI – epídoto; TIT – titanita; ZIR – zircão; TUR – turmalina marrom; RUT – rutilo; ALT - alterita.



Os resultados apontam para uma proveniência predominante de rochas metamórficas de alto grau (hornblenda, rutilo), com componentes paraderivados (cianita, estauroлита, sillimanita, andaluzita) e relativo enriquecimento titanífero (titanita, anatásio). Na assembleia como um todo, o elevado número de minerais instáveis, metaestáveis e de alterita (minerais alterados de difícil identificação ótica) sugere boas condições para testar a suscetibilidade à alteração química eodiagenética. Os eventuais grãos de alterita com resquícios de textura e propriedades óticas originais se assemelham a anfibólios (clivagens e cor de interferência) (Figura 12).

Figura 12. Fotomicrografias dos principais minerais pesados presentes nas amostras identificados com auxílio de microscópio de luz polarizada. À esquerda, com nicóis paralelos e à direita, com nicóis cruzados. Siglas: HBV-Hornblenda Verde; ZOI-Zoisita; TUR-Turmalina; FIB-Fibrolita; EST-Estauroлита; ALT-Alterita; SIL-Silimanita; TIT-Titanita; AND-Andaluzita; ZIR-Zircão; RUT-Rutilo; CIA-Cianita; EPI-Epidoto.



4.4. MATRIZ DE CORRELAÇÃO

Para melhor representatividade, a análise de correção linear foi feita apenas para os minerais cuja contagem bruta média foi maior do que 1 entre as dezoito amostras (ou seja, exceto os traços). Dentro dos parâmetros estabelecidos para aceitação da correlação ($r > +0,6$ ou $< -0,6$, $p < 0,01$), os melhores pares foram hornblenda verde com hornblenda marrom ($r = +0,647$, $p = 0,004$), cianita com hornblenda verde ($r = -0,619$, $p = 0,006$), com hornblenda marrom ($r = -0,633$, $p = 0,005$) e com turmalina marrom ($r = +0,754$, $p = 0$), e rutilo com alterita ($r = -0,625$, $p = 0,006$) (Figura 13).

Figura 13: Matriz de correlação linear dos minerais pesados mais comuns com índices de significância de $r > +0,6$ (ou $< -0,6$: correlação negativa) e $p < 0,01$ destacados em negrito. Símbolos: HBV – hornblenda verde; HBM – hornblenda marrom; AND – andaluzita; CIA – cianita; SIL – silimanita; EST – estauroлита; EPI – epidoto; TIT – titanita; ZIR – zircão; TUR – turmalina marrom (schorlítica); RUT – rutilo; ALT – alterita.

	HBV	HBM	AND	CIA	SIL	EST	EPI	TIT	ZIR	TUR	RUT
HBV	0.647										
	0.004										
AND	0.202	0.414									
	0.421	0.087									
CIA	-0.619	-0.633	-0.221								
	0.006	0.005	0.379								
SIL	-0.032	-0.33	-0.161	0.466							
	0.901	0.181	0.522	0.051							
EST	-0.195	-0.171	-0.162	0.4	0.376						
	0.438	0.497	0.52	0.1	0.124						
EPI	0.504	0.2	0.201	-0.323	0.171	-0.007					
	0.033	0.426	0.424	0.191	0.498	0.977					
TIT	-0.036	-0.394	-0.501	0.382	0.225	0.33	0.024				
	0.888	0.106	0.034	0.118	0.369	0.181	0.924				
ZIR	-0.332	-0.316	-0.224	0.088	-0.035	0.344	0.258	0.125			
	0.178	0.202	0.372	0.729	0.892	0.162	0.301	0.62			
TUR	-0.468	-0.356	-0.105	0.754	0.449	0.588	-0.264	0.185	0.179		
	0.05	0.146	0.68	0	0.061	0.01	0.291	0.463	0.478		
RUT	-0.256	-0.147	-0.014	0.518	0.115	0.299	-0.565	0.346	-0.209	0.599	
	0.305	0.56	0.957	0.028	0.65	0.228	0.015	0.159	0.406	0.009	
ALT	0.363	-0.046	-0.024	-0.03	0.411	-0.104	0.584	-0.024	0.103	-0.209	-0.625
	0.139	0.856	0.926	0.907	0.09	0.681	0.011	0.925	0.683	0.406	0.006
Cell contents:	Pearson correlation										
	P-Value										

Três das melhores correlações envolveram cianita, indicando que este mineral é possivelmente o mais sensível em indicar as mudanças na assembleia de minerais pesados do Pecém. Sendo a cianita quimicamente mais resistente que a hornblenda, especialmente que as variedades marrons (hastingsítica, óxi-hornblenda) em condições ácidas (PETTIJOHN, 1975; MANGE; MAURER, 1991), a correlação negativa pode indicar aumento relativo da cianita às expensas de hornblenda nos depósitos eólicos mais antigos. Ademais, a correlação positiva entre as duas variedades de hornblenda (verde e marrom) sugere que, apesar de sua proveniência primária ser diferente, a proveniência secundária (imediate) deve ser a mesma e, por seu grau de suscetibilidade comum à alteração química, suas correlações com cianita (discutidas anteriormente) podem ser feitas em conjunto.

A correlação positiva entre cianita e turmalina marrom (schorlítica) é difícil de explicar, pois são minerais com fontes primárias potencialmente distintas (MANGE; MAURER, 1991) e, além disso, sua suscetibilidade à alteração química (o primeiro é metaestável, e o segundo, ultraestável) é contrastante (PETTIJOHN, 1975). Uma possibilidade é que, no curto espaço de tempo da eodiagênese aqui discutida (possivelmente de centenas a poucos milhares de anos, no máximo: HESP et al., 2009), ambos possuam comportamento estável ao intemperismo ácido e aumentem às expensas de outros componentes mais frágeis (como a hornblenda). Essa hipótese, no entanto, é altamente especulativa e carece de testes mais robustos até o momento. Por fim, a alta correlação negativa de rutilo (ultraestável) com alterita (produto de alteração química dos minerais mais frágeis) não possui nenhuma explicação clara até o momento.

4.5. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.

A análise de componentes principais foi realizada para os mesmos 11 minerais pesados com ocorrência acima de 1% em massa média mais alterita. Os cinco primeiros componentes obtiveram mais de 5% de variância individualmente, sendo que os dois primeiros componentes respondem por mais de 69% (Tabela 1).

Tabela 1: Componentes principais (PC), valores próprios (eigenvalue), porcentagem da variância (% variance) e porcentagem de variância acumulada (% var acum) dos primeiros cinco componentes com porcentagem de variância acima de 5%.

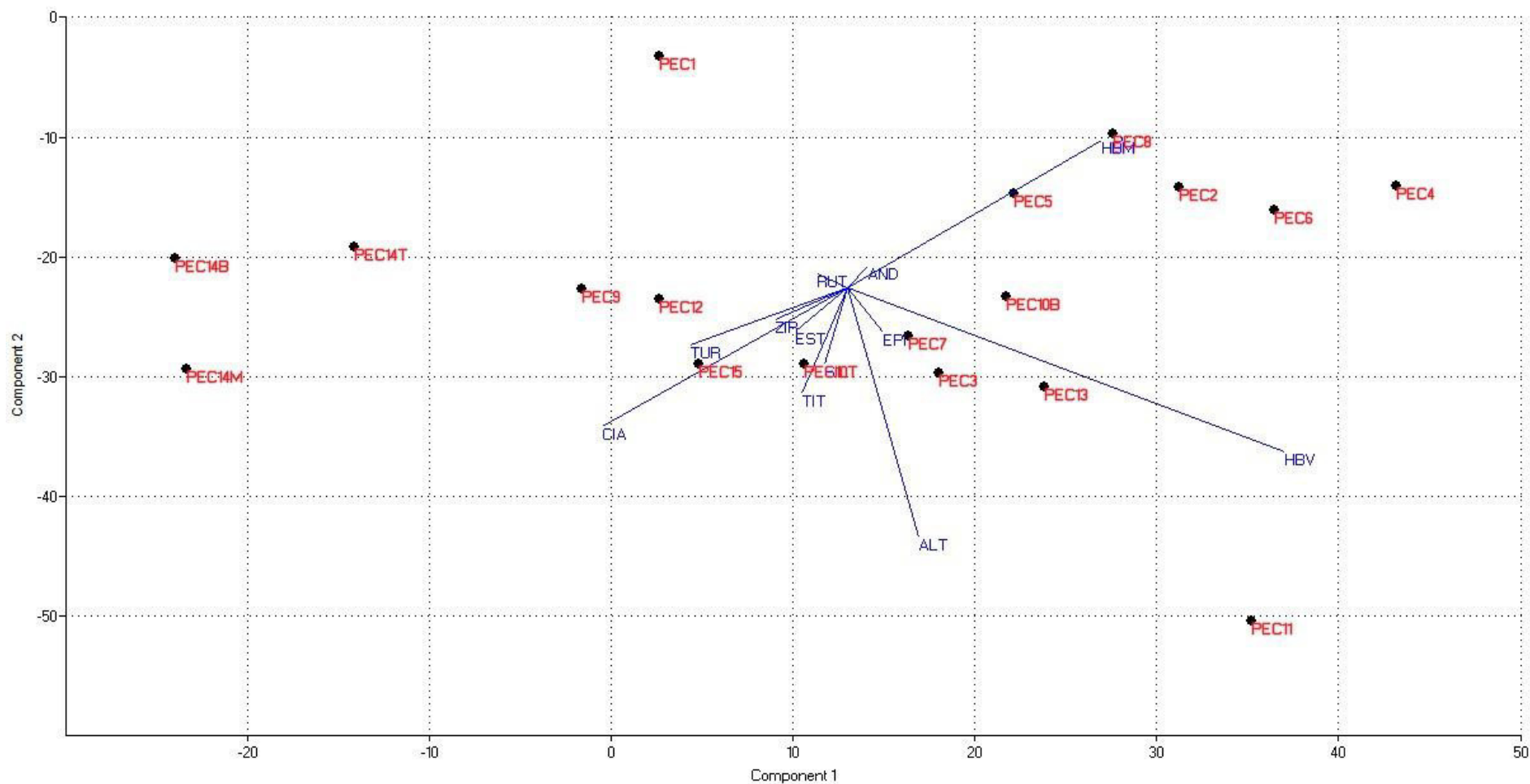
PC	Eigenvalue	% variance	% var acum
1	396.164	54.326	54.326
2	108.135	14.829	69.155
3	81.3575	11.157	80.312
4	50.1062	6.8711	87.183
5	45.8608	6.2889	93.472

Graficamente, a dois componentes principais (1 e 2), nota-se que os maiores eixos-pesos foram os da hornblenda verde, hornblenda marrom, alterita e cianita (Figura 14). Os eixos-pesos de hornblenda marrom e cianita apresentaram paralelismo em lados opostos, o que implica que as condições pelas quais eles respondem são antagônicas, mas potencialmente relacionadas. Os eixos-pesos de alterita e hornblenda verde são ligeiramente ortogonais aos de cianita e hornblenda marrom, implicando baixíssima relação entre as variáveis que controlam os dois grupos. Alterita e hornblenda verde, no entanto, não são paralelos entre si, mas ocorrem no mesmo lado em relação ao centro de irradiação dos eixos. Esse resultado sugere que a alterita não seria formada às expensas dos minerais considerados. Uma possibilidade seria ter sofrido alteração química na própria fonte antes de ser transportada para os depósitos eólicos, mas os meios usados aqui não corroboram nem descartam essa ideia.

Os escores das amostras se dividiram em duas regiões principais alinhadas à esquerda e à direita do gráfico, onde concentram, respectivamente, a maioria das amostras de depósitos mais antigos e mais novos (entre as exceções, PEC13, eolianito, junto aos novos). A maioria dos escores não possui afinidade (proximidade) em torno de eixos-pesos específicos; neste aspecto, os eixos-

pesos mais fortes foram os da hornblenda marrom e da hornblenda verde com três a quatro escores cada. O resultado geral indica pouca capacidade das amostras eólicas do Pecém em indicar modalidades específicas de alteração química eodiagenética com base nos minerais pesados.

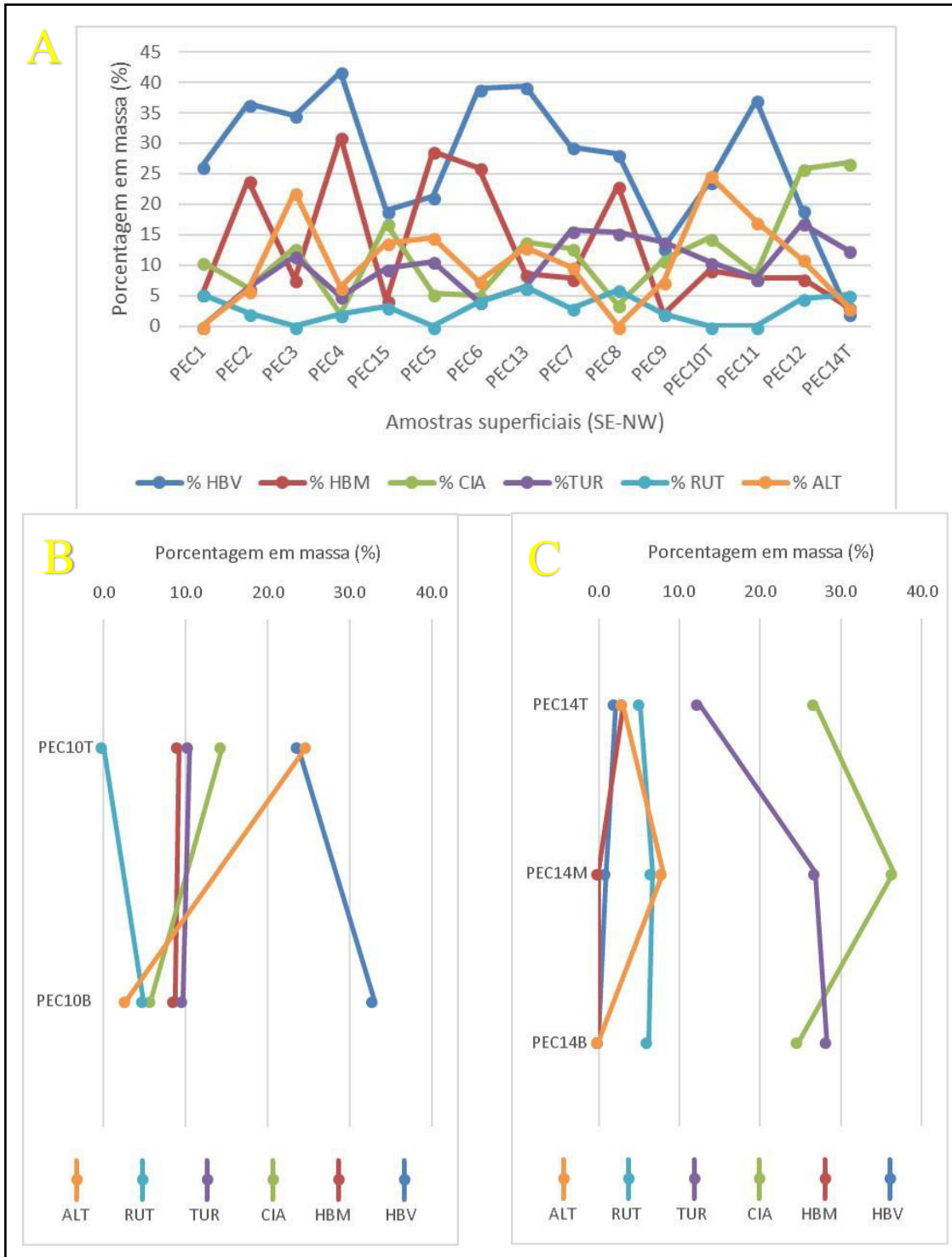
Figura 14: Gráfico biplot de escores (amostras: pontos) e pesos (minerais: vetores) onde os dois primeiros componentes da contagem de minerais pesados de todas as amostras são utilizados. Siglas de minerais: HBM – hornblenda marrom; HBV – hornblenda verde; AND – andaluzita; RUT – rutilo; EPI – epidoto; ZIR – zircão; EST – estaurólita; TIT – titanita; TUR – turmalina marrom; CIA – cianita.



4.6. DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL DOS DADOS DE MINERAIS PESADOS

Apesar da baixa capacidade em indicar alteração eodiagenética demonstrada pelas análises por matriz de correlação e componentes principais sobre a contagem dos minerais pesados, seu resultado foi útil em apontar para os minerais pesados com variações e relações mútuas de ocorrência mais interessantes, talvez controladas por um mecanismo não detectado nas análises descritas. Neste âmbito, para comparar sua distribuição horizontal (ao longo do perfil, amostras superficiais) e vertical (nas amostras com coleta em diferentes níveis de solo desenvolvido), foram escolhidos hornblenda verde, hornblenda marrom, cianita, turmalina, rutilo e alterita (Figura 15).

Figura 15: Em A, gráfico de distribuição horizontal e vertical dos dados de minerais pesados de todas as quinze amostras superficiais. Nos gráficos B e C, as amostras PEC10 e PEC14 são exibidas de acordo com a variação de minerais pesados ao longo de seu perfil vertical.



Ao longo do perfil (Figura 15A), hornblenda verde e marrom apresentaram comportamento quase especular (inverso) com a cianita, resultado semelhante ao já visto na matriz de correlação. Isto reforça a ideia de uma correlação inversa entre esses minerais, com aumento relativo de cianita às expensas de hornblenda, o que poderia ser devido à alteração química eodiagenética. Neste aspecto, chama atenção o declínio no teor de hornblenda em três diferentes pontos, coincidentes com amostras de três dos depósitos mais antigos (PEC15: eolianito; PEC9 e PEC14: paleodunas). Na horizontal, os demais minerais não apresentaram comportamento significativo para interpretação. A alterita, sempre tida como potencial como indicador de alteração (VAN ANDEL, 1958), não apresentou comportamento especular claro com os minerais mais instáveis (hornblenda verde e marrom) na região do Porto do Pecém.

A análise vertical foi restrita às amostras de paleodunas com solo quartzarênico desenvolvido, a saber, PEC10 e PEC14. Na amostra PEC10 (Figura 15B), hornblenda verde e alterita variam de modo especular, com diminuição da primeira e aumento da segunda para o topo. Em geral, esse comportamento seria devido ao efeito mais intenso do intemperismo ácido no horizonte A eluvial (lixiviado, posicionado acima) enquanto o horizonte B iluvial (concentrante dos materiais lixiviados acima, posicionado abaixo) seria revestido por cimentos orgânicos e óxi-hidróxidos, protegendo parte dos minerais suscetíveis à alteração química. No entanto, essa interpretação não encontra suporte nas análises anteriores, onde não se observa relação clara entre hornblenda e alterita; ademais, o número limitado de análises verticais do mesmo tipo fragiliza essa interpretação. Além disso, a amostra PEC14, justamente aquela com perfil vertical mais completo em função da profundidade do perfil de solo, não apresentou nenhuma variação claramente interpretável nos teores de minerais pesados.

CONCLUSÕES

O perfil topográfico realizado desde a praia rumo ao sistema eólico adjacente ao Porto do Pecém revelou tratar-se de uma região bem completa, possuindo tanto feições recentes (especialmente dunas frontais e parabólicas ativas) como antigas (principalmente eolianitos e paleodunas parabólicas vegetadas ou fósseis), com uma destacada planície de deflação entre ou em meio a elas. Trata-se, portanto, de uma região apropriada ao estudo proposto de testar o efeito da alteração eodiagenética em depósitos recentes (quaternários).

Na identificação de componentes detríticos das areias por lupa, os materiais mais suscetíveis (bioclastos carbonáticos e feldspatos) ocorrem em quantidade muito pequena, dificultando a interpretação geral, especialmente nos perfis verticais de solo. Na distribuição horizontal, o único indício foi uma redução do teor de feldspato em dois dos depósitos mais antigos.

A identificação e contagem dos minerais pesados nas amostras do Porto do Pecém apresentou uma assembleia geral tida pela literatura geocientífica como favorável à análise da alteração eodiagenética pois é rica em componentes instáveis, metaestáveis e alterita. O teor médio combinado destas três categorias de minerais pesados chega a 87%.

A matriz de correlação calculada para os minerais pesados sugere que os melhores pares na interpretação da eodiagênese seriam cianita com hornblenda verde e cianita com hornblenda marrom, ambos com base na boa correlação inversa e na maior suscetibilidade do segundo mineral. Outros tipos de correlação relativamente elevada não se relacionam, em princípio, com a alteração dos minerais ou são difíceis de interpretar (caso do par rutilo-alterita).

A análise de componentes principais (ACP) destacou quatro dos principais minerais envolvidos nas mais altas correlações da matriz: hornblenda verde, hornblenda marrom, alterita e cianita. Esta análise reforça a ideia da baixa capacidade da alterita como indicadora da alteração eodiagenética, a despeito de trabalhos da literatura geocientífica, e ainda sugere (ainda que preliminarmente) a possibilidade de alterações herdadas da fonte primária. Como a maioria dos escores (amostras) não possuem muita afinidade com eixos-pesos (minerais) específicos, o resultado também sugere baixa capacidade da assembleia em indicar a alteração eodiagenética no Porto do Pecém, a despeito da assembleia em si sugerir o oposto.

Geograficamente, a distribuição horizontal dos seis minerais pesados com mais alta correlação obtida da matriz (hornblenda verde, hornblenda marrom, cianita, turmalina, rutilo e alterita) reforça a relação inversa entre cianita e hornblenda (verde e marrom), especialmente em três dos depósitos mais antigos. Verticalmente, a distribuição dos minerais pesados não é numericamente consistente com interpretações da eodiagênese no solo quartzarênico e, qualitativamente, não encontra suporte nas análises estatísticas da matriz de correlação e da ACP.

Por fim, a interpretação geral do presente estudo é qualitativamente limitada e, estatisticamente, no máximo razoável (maioria dos melhores níveis de $r < 0,7$) em apontar a alteração eodiagenética. Há potencial nas análises voltadas para o estudo da eodiagênese, mas há necessidade de um estudo voltado especificamente para pares indicadores da alteração química ácida e para a origem da alterita estudada.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BOGGS, Sam, Jr. **Petrology of sedimentary rocks**. Cambridge University Press (2nd Ed.), 2009, 600p.

CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MEDEIROS, M.F.; PAIVA, I.P.; GOMES, F.E.M.; CAVALCANTE, S.N.; CAVALCANTE, J.E.; MELO, A.C.R.; DUARTE NETO, V.C. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Mapa Geológico do Estado do Ceará. Fortaleza, 2003. Escala 1:500.000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Mapas de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro, 2006. Escala 1:5.000.000.

FOLK, R.L. **Petrology of sedimentary rocks** (2nd ed.). Austin (Texas, USA), Hemphill's bookstore, 1980, 184 p.

FRIEDMAN, G.M.; SANDERS, J.E.; KOPASKA-MERKEL, D.C. **Principles of Sedimentary Deposits**. New York, Macmillan Publ. Co., 1992, 717p.

FUJIMORU, Shiguemi; FERREIRA, Yeda A. **Introdução ao uso do microscópio petrográfico**. 1^a ed. Salvador: Editora da UFBA, 1979.

GALEHOUSE, J.S. **Point Counting**. In: CARVER R.E. (Org.). **Procedures in Sedimentary Petrology**. New York: Wiley-Interscience, 1971, p. 385-407.

GIANNINI, Paulo C.F.; RICCOMINI, Claudio. **Sedimentos e processos sedimentares**. In: Texeira, W.; Toledo, M.C.M.; Fairchild, T.H.; Taioli, F. (org). **Decifrando a Terra**. Oficina de Textos, 2000, 568 p.

HAIR, J.F., JR; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise Multivariada de Dados**. 5^a Edição Traduzida de Prentice-Hall Ed. (2005) por Ed. Bookman (Porto Alegre), 1998, 593p.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.R.; RYAN, P.D. Past: Palaeontological Statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica** vol. 4, n. 1, 9 p., 2001.

HESO, Patrick A.; MAIS, Luiz P.; CLAUDINO-SALES, Vanda. **The Holocene Barriers of Maranhão, Piauí and Ceará States, Northeastern Brazil**. In: DILLENBURG, Sérgio R. &

HESP, Patrick A. (Eds.). **Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil**. Springer, 2009, 380 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS DO CEARÁ (IPECE). **Ceará em Mapas**. Mapa de Solos, Fortaleza, 2007, Escala 1:600.000.

KERR, Paul F. **Optical mineralogy**. New York: McGraw Hill, 1959, 372p.

MANGE, Maria A.; MAURER, Heinz F.W. **Heavy minerals in colour**. 1st ed. London: Chapman & Hall, 1992, 147 p.

MORTON, Andrew C.; HALLSWORTH, Claire R. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, 90: 241-256.

MORTON, Andrew C.; HALLSWORTH, Claire R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, v.124, pp. 3-29, 1999.

MOURA, Pâmela. **Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará**. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. Dissertação de mestrado (inéd.), 128 p., Anexos, 2014.

PETTIJOHN, Francis J. **Sedimentary Rocks**. Harper & Row Pubs., 3rd ed., 1975, 628 p.

SUGUIO, Kenitiro. **Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais**. Oficina de Textos, 2010, 408p.

TROGGER, W.E. **Optical determination of rock-forming minerals, part 1: determination tables**. Stuttgart, 1979, 188p.

VAN ANDEL, T.H. A defense of the term alterite. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.28, n.2, pp. 234-235, 1958.

WITTE, R.S.; WITTE, J.S. **Estatística**. Editora LTC, 7^a edição, Rio de Janeiro, 2005, 486p.

APÊNDICE

Código da amostra	HBV	HBM	GRA	AND	CIA	SIL	EST	CLZ	EPI	FIB	TRE	MON	COR	TIT	ZIR	TUR	RUT	ANA	ALT	OPA	MP	MPT	MPT-ALT
PEC1	5	1	1	0	2	0	2	0	0	0	1	1	0	2	2	0	1	1	0	6	25	19	19
PEC2	35	23	0	4	6	0	5	0	3	2	3	0	0	2	4	6	2	1	6	6	108	102	96
PEC3	27	6	0	6	10	7	3	0	4	0	3	0	0	0	3	9	0	0	22	3	103	100	78
PEC4	43	32	1	2	2	4	2	2	3	0	0	0	0	4	1	5	2	0	7	11	121	110	103
PEC5	20	27	0	4	5	6	7	0	7	0	0	0	0	0	8	10	0	0	16	15	125	110	94
PEC6	39	26	0	4	5	0	6	0	5	0	0	0	0	4	3	4	4	0	8	18	126	108	100
PEC7	30	8	0	5	13	9	7	0	8	0	0	0	0	0	3	16	3	0	11	11	124	113	102
PEC8	33	27	0	7	4	4	12	0	1	0	0	0	0	1	3	18	7	0	0	24	141	117	117
PEC9	13	2	0	1	11	4	9	1	6	0	0	0	0	9	29	14	2	0	8	66	175	109	101
PEC10B	34	9	0	2	6	6	6	0	5	0	0	0	0	18	2	10	5	0	3	5	111	106	103
PEC10T	18	7	1	2	11	7	5	0	4	0	0	0	0	0	13	8	0	0	25	6	107	101	76
PEC11	52	11	0	0	12	9	16	0	8	0	0	0	0	14	7	11	0	0	29	8	177	169	140
PEC12	17	7	0	6	23	3	2	0	4	1	0	0	0	3	4	15	4	0	11	4	104	100	89
PEC13	37	8	0	1	13	8	2	0	2	1	0	0	0	9	1	6	6	0	14	8	116	108	94
PEC14B	0	0	3	0	28	6	17	0	0	0	0	0	0	7	13	32	7	0	0	27	140	113	113
PEC14M	1	0	0	0	38	9	8	0	0	0	0	0	0	13	0	28	7	0	9	20	133	113	104
PEC14T	2	3	0	4	26	8	16	0	2	0	0	0	0	11	8	12	5	0	3	25	125	100	97
PEC15	18	4	0	3	16	2	6	0	5	0	0	0	1	16	12	9	3	0	15	6	116	110	95
Média geral	23,6	11,2	0,3	2,8	12,8	5,1	7,3	0,2	3,7	0,2	0,4	0,1	0,1	6,3	6,4	11,8	3,2	0,1	10,4	14,9	120,9	106,0	95,6
Máximo	52	32	3	7	38	9	17	2	8	2	3	1	1	18	29	32	7	1	29	66	177	169	140
Mínimo	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	25	19	19
Total	424	201	6	51	231	92	131	3	67	4	7	1	1	113	116	213	58	2	187	269	2177	1908	1721

Tabela I: Contagem bruta dos minerais pesados. Siglas: HBV – hornblenda verde; HBM – hornblenda marrom; GRA – granada; AND – andaluzita; CIA – cianita; SIL – silimanita; EST – estauroilita; CLZ – clinozoisita; EPI – epidoto; FIB – fibrolita; TER – tremolita; MON – monazita; COR – coríndon; TIT – titanita; ZIR – zircão; TUR – turmalina; RUT – rutílio; ANA – anatásio; ALT – alterita; OPA – opacos; MP – total de minerais pesados; MPT – total de minerais pesados transparentes; MPT-ALT – minerais pesados transparentes sem alterita.

Código da amostra	% HBV	% HBM	% GRA	% AND	% CIA	% SIL	% EST	% CLZ	% EPI	% FIB	%TRE	% MON	%COR	%TIT	% ZIR	%TUR	% RUT	% ANA	% ALT	% OPA	%TR
PEC1	26,3	5,3	5,3	0,0	10,5	0,0	10,5	0,0	0,0	0,0	5,3	5,3	0,0	10,5	10,5	0,0	5,3	5,3	0,0	31,6	0,0
PEC2	36,5	24,0	0,0	4,2	6,3	0,0	5,2	0,0	3,1	2,1	3,1	0,0	0,0	2,1	4,2	6,3	2,1	1,0	5,9	5,9	0,0
PEC3	34,6	7,7	0,0	7,7	12,8	9,0	3,8	0,0	5,1	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	3,8	11,5	0,0	0,0	22,0	3,0	0,0
PEC4	41,7	31,1	1,0	1,9	1,9	3,9	1,9	1,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	1,0	4,9	1,9	0,0	6,4	10,0	0,0
PEC5	21,3	28,7	0,0	4,3	5,3	6,4	7,4	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	10,6	0,0	0,0	14,5	13,6	0,0
PEC6	39,0	26,0	0,0	4,0	5,0	0,0	6,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	3,0	4,0	4,0	0,0	7,4	16,7	0,0
PEC7	29,4	7,8	0,0	4,9	12,7	8,8	6,9	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	15,7	2,9	0,0	9,7	9,7	0,0
PEC8	28,2	23,1	0,0	6,0	3,4	3,4	10,3	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	2,6	15,4	6,0	0,0	0,0	20,5	1,8
PEC9	12,9	2,0	0,0	1,0	10,9	4,0	8,9	1,0	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	28,7	13,9	2,0	0,0	7,3	60,6	0,0
PEC10B	33,0	8,7	0,0	1,9	5,8	5,8	5,8	0,0	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	17,5	1,9	9,7	4,9	0,0	2,8	4,7	0,0
PEC10T	23,7	9,2	1,3	2,6	14,5	9,2	6,6	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,1	10,5	0,0	0,0	24,8	5,9	0,0
PEC11	37,1	7,9	0,0	0,0	8,6	6,4	11,4	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	5,0	7,9	0,0	0,0	17,2	4,7	0,0
PEC12	19,1	7,9	0,0	6,7	25,8	3,4	2,2	0,0	4,5	1,1	0,0	0,0	0,0	3,4	4,5	16,9	4,5	0,0	11,0	4,0	0,0
PEC13	39,4	8,5	0,0	1,1	13,8	8,5	2,1	0,0	2,1	1,1	0,0	0,0	0,0	9,6	1,1	6,4	6,4	0,0	13,0	7,4	0,0
PEC14B	0,0	0,0	2,7	0,0	24,8	5,3	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	11,5	28,3	6,2	0,0	0,0	23,9	0,0
PEC14M	1,0	0,0	0,0	0,0	36,5	8,7	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	0,0	26,9	6,7	0,0	8,0	17,7	0,0
PEC14T	2,1	3,1	0,0	4,1	26,8	8,2	16,5	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3	8,2	12,4	5,2	0,0	3,0	25,0	0,0
PEC15	18,9	4,2	0,0	3,2	16,8	2,1	6,3	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0	1,1	16,8	12,6	9,5	3,2	0,0	13,6	5,5	0,0
Média geral	24,7	11,4	0,6	3,0	13,5	5,2	7,5	0,2	3,8	0,2	0,7	0,3	0,1	6,5	7,1	11,7	3,4	0,4	9,3	15,0	0,1
Máximo	41,7	31,1	5,3	7,7	36,5	9,2	16,5	1,9	7,8	2,1	5,3	5,3	1,1	17,5	28,7	28,3	6,7	5,3	24,8	60,6	1,8
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0
Total	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela II: Percentual dos minerais pesados com base na contagem bruta, onde TR – minerais traços.