



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

LUIZA SILVA WERNECK

GEOQUÍMICA DAS ROCHAS ALCALINAS MÁFICAS SUBAFLORANTES NA
ZONA URBANA DE FORTALEZA – CE

FORTALEZA

2018

LUIZA SILVA WERNECK

GEOQUÍMICA DAS ROCHAS ALCALINAS MÁFICAS SUBAFLORANTES NA ZONA
URBANA DE FORTALEZA – CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Christiano Magini.

FORTALEZA

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)

- W524g Werneck, Luiza Silva.
Geoquímica das rochas alcalinas máficas subafiorantes na zona urbana de Fortaleza – CE / Luiza Silva
Werneck. – 2018.
69 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Geologia, Fortaleza, 2018.
Orientação: Profa. Ma. Christiano Magini.
1. Geoquímica. 2. Vulcanismo Alcalino. 3. Petrografia. 4. Análise de Correspondências. I. Título.
CDD 551
-

LUIZA SILVA WERNECK

GEOQUÍMICA DAS ROCHAS ALCALINAS MÁFICAS SUBAFLORANTES NA ZONA
URBANA DE FORTALEZA – CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.
Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Cristiano Magini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Lucilene Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nepomuceno Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas fizeram parte dessa caminhada nos últimos dois anos, algumas bem de perto e outras de bastante longe. Nomeá-las todas seria uma tarefa árdua e nem me atrevo a tentar. Assim, citarei aqui aqueles que me ajudaram diretamente em questões da pesquisa e sem os quais este trabalho não teria chegado tão longe.

Ao Professor Dr. Christiano Magini por aceitar, antes mesmo de me conhecer, a embarcar nesta aventura na qual além de orientação ofereceu também suporte e compreensão.

Ao Metrofor, nas pessoas do Sr. Newton Cesar Martiniano do Amaral Mourão e Sr. Maurílio Banhos Dias, do Departamento de Obras Subterrâneas da Seinfra, que tornaram possível o acesso às amostras e fizeram o intermédio entre o meu pedido e o Consórcio.

Ao Governo do Estado do Ceará, pela liberação das amostras.

Ao ilustre Victor Diego Almeida por me instruir no início do processo de solicitação de informação junto ao Governo do Estado do Ceará e me ajudar a procurar as pessoas certas quando a burocracia se mostrou contraproducente.

Ao engenheiro Juan Medina Puente, e todos os envolvidos da Acciona por permitirem o acesso às amostras logo no início.

À colega Herdivânia Sousa, pelo Norte quando eu ainda não tinha ideia no que tinha me metido.

Aos meninos do Laboratório de Microscopia Eletrônica, os queridos Antônio Leal, Joel Pedrosa, Diones Oliveira e Agnaldo Freitas, que sempre estiveram dispostos a compartilhar tempo e informações, nunca dinheiro.

Ao Professor Dr. Afonso Almeida, que além de compartilhar o melhor gosto musical também me ensinou mineralogia e geoquímica, sempre disponível.

À Professora Dra. Lucilene Santos, que mostrou um nível de paciência, disposição e comprometimento com a ciência que eu ainda não havia tido contato.

Aos pesquisadores e Professores Dr. Francisco Nepomuceno, Dr. Rogério Antunes e Dr. Daniel Rodrigues, por disponibilizarem ajuda e conhecimento em uma área sobre a qual eu mal conhecia a ponta do iceberg.

Aos professores do Departamento de Geologia da UFC, que me acolheram tão bem, em especial à Professora Dra. Rita Salgueiro que tornou o Capítulo 5 possível.

Ao Elicius, meu grande companheiro, que deu suporte a uma decisão difícil que não só me tirava da zona de conforto, mas o tirava da dele também.

Aos meus pais, Marta e Wilson, que deram sempre o que tinham de melhor e me apoiaram em todas as minhas decisões, desde sempre.

E aos que estiveram comigo nos intervalos de descanso e distração entre uma descrição petrográfica e uma interpretação geoquímica, em Fortaleza ou em BH, saibam que sou muito grata.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

"O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. [...] aprendendo a ser capaz de ficar alegre a mais, no meio da alegria, e inda mais alegre ainda no meio da tristeza! Só assim de repente, na horinha em que se quer, de propósito – por coragem."

Guimarães Rosa

RESUMO

O vulcanismo alcalino Cenozoico no Estado do Ceará, nomeadamente na Região Metropolitana de Fortaleza, é representado por fonolitos e traquitos em forma de necks, plugs, domos e estruturas concêntricas, com raros diques de tefritos e fonotefritos. A ocorrência do vulcanismo subaflorante em Fortaleza, objeto de estudo deste trabalho, é classificada como um basanita fortemente enriquecido em elementos incompatíveis (Ba, Th, U, Ta, Nb, La e Ce), tem em torno 400 por 320 metros em área e no mínimo 20 metros de espessura. Os dados geoquímicos e as análises estatísticas multivariadas sugerem que esta ocorrência é o membro máfico do Vulcanismo Messejana, que se localiza no prolongamento continental da Zona de Fratura Fernando de Noronha, o que indica um caráter bimodal a este evento. Em uma comparação entre as amostras do Vulcanismo Fernando de Noronha, que originou o arquipélago homônimo e cuja idade varia entre $12,5 \pm 0,1$ e $1,3 \pm 0,1$ Ma, com os dados da suíte estudada é possível perceber fortes correlações petrográficas e geoquímicas entre as rochas nas duas localidades. O magma que originou este basanita apresenta padrões de elementos terras raras fortemente fracionados com razão Ce/YbN de 18,02 a 20,17, enriquecidos em ETRL, sem anomalia de Eu. Apresenta depleções nos elementos Sm, Eu, Ti, Tb, Y e Yb, e enriquecimentos em Cs e Rb, sendo correlacionáveis ao padrão OIB. Entretanto, características como o enriquecimento nos elementos Ba, Th e U, e depleção de Sr e P indicam influência crustal. A aplicação de uma análise multivariada, no caso a Análise Fatorial das Correspondências, permite o tratamento de dados geoquímicos em um espaço dimensional reduzido, tornando possível a compreensão dos processos de comportamento dos indivíduos. O método evidenciou a grande similaridade entre o basanita subaflorante em Fortaleza com os basanitos do Vulcanismo Fernando de Noronha, tais como valores maiores de Na₂O, K₂O, Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅ e CaO₂ e menores de SiO₂ e MgO relativamente aos basanitos do Vulcanismo Macau. Os elementos traço Rb, Nb, Th e Ga se correlacionam e aumentam ou diminuem juntos para cada um dos vulcanismos, enquanto Sr e Ba comportam-se inversamente ao conjunto Cr e Ni.

Palavras-chave: Província Borborema. Geoquímica. Vulcanismo Cenozoico Alcalino. Vulcanismo Messejana. Mecejana. Geomatemática. Análise Multivariada.

ABSTRACT

The Cenozoic alkaline volcanism in Ceará State, specific at metropolitan region of Fortaleza, is represented by necks, plugs and domes of phonolites and trachytes, with rare described dikes of tephrites and phonotephrites. The new subsurface volcanic rock in Fortaleza is classified as a basanite strongly enriched by incompatible elements (Ba, Th, U, Ta, Nb, La e Ce), which is almost 400 by 320 meters in area and at least 20 meters of thickness. Geochemistry data and multivariate analysis show this occurrence is the mafic member of the Messejana Volcanism, which is in the continental prolongation of the Fernando Noronha Fracture Zone, indicating a bimodal character to this event. A comparison of Fernando de Noronha Volcanism samples, which had originated the namesake archipelago with ages between 12.5 ± 0.1 e 1.3 ± 0.1 My, and the study area data shows strong petrographic and geochemical resemblance among the both localities rocks. The magma which has originated this basanite shows strong REE fractionation pattern and Ce/Yb_N rate of 18,02 to 20,17, enriched in REEL, absent Eu anomaly. It also presents depletions of Sm, Eu, Tl, Tb, Y, and Yb, while shows enrichment of Cs and Rb, which could be related to the OIB pattern. However, Ba, Th and U enrichment and Sr and P depletion reveal crustal influence. Applying a multivariate analysis, such as Correspondence Analysis, to the geochemical data allow its interpretation in a reduced dimensional space, thus understanding the behavioral processes of individuals. This method indicated a strong geochemical similarity among Fortaleza and Fernando de Noronha basanites, such as higher values of Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 and CaO_2 , and smaller values of SiO_2 e MgO relatively to those of Macau Volcanism. Trace elements like Rb, Nb, Th and Ga are correlated, and its values increase or diminish together on each volcanism, while Sr and Ba have an inverse behavior comparing to Cr and Ni.

Keywords: Province Borborema. Geochemistry. Cenozoic alkaline volcanism. Messejana Volcanism. Mecejana. Geomathematics. Multivariate Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Localização dos furos de sondagem rotativa da obra do metrô na área de estudo no mapa de Fortaleza.....	4
Figura 2	–	Perfil Longitudinal e Perfis Transversais de Sísmica Passiva Roadside MASW (<i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i>).....	4
Figura 3	–	Exemplificação genérica de um conjunto de partida, uma tabela de contingência, uma matriz disjuntiva completa e de uma matriz de Brut.....	8
Figura 4	–	A Província Borborema no contexto do Supercontinente Gondwana.....	11
Figura 5	–	Esboço geológico da compartimentação da porção Setentrional da Província Borborema, sua relação espacial com o Arquipélago de Fernando de Noronha e Geologia da Região Metropolitana de Fortaleza, com destaque para os corpos alcalinos félsicos do Vulcanismo Messejana.....	12
Figura 6	–	Localização dos vulcanismos Meso-Cenozoicos da Província Borborema Setentrional.....	15
Figura 7	–	Seção estratigráfica da área de estudo.....	21
Figura 8	–	Calcário encontrado nos testemunhos de sondagem.....	22
Figura 9	–	Feições macroscópicas características do basanita.....	23
Figura 10	–	Feições macro e microscópicas da vulcanoclástica.....	24
Figura 11	–	Feições macroscópicas do arenito da Fm. Barreiras.....	25
Figura 12	–	Feições macroscópicas do siltito arenoso da Fm. Barreiras.....	26
Figura 13	–	Feições macroscópicas da laterita da Fm. Barreiras.....	27
Figura 14	–	Feições macroscópicas dos sedimentos quaternários.....	28
Figura 15	–	Fotomicrografias de feições características do basanita.....	33
Figura 16	–	Diagramas $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. $\text{NaO}/\text{K}_2\text{O}$ e CaO vs. Na_2O	35
Figura 17	–	Diagrama TAS com as amostras dos vulcanismo e Fortaleza, Messejana, Fernando de Noronha, Macau e Rio Ceará Mirim.....	36
Figura 18	–	Diagrama de variação de Harker para as amostras de Fortaleza, do <i>neck</i> Pão de Açúcar e do Vulcanismo Fernando de Noronha.....	37
Figura 19	–	Diagramas de ETR das alcalinas básicas de Fortaleza e das alcalinas félsicas do <i>neck</i> Pão de Açúcar normalizados pelo Condrito-C1.....	40
Figura 20	–	Diagramas do tipo <i>Spider</i> normalizados pelo Condrito-C1 para as alcalinas máficas de Fortaleza em comparação aos padrões OIB, Crosta Continental Inferior e Crosta Continental Superior.....	41

Figura 21	– Diagrama <i>Spider</i> normalizados pelo Condrito-C1 para as rochas do <i>neck</i> Pão de Açúcar.....	42
Figura 22	– Diagramas ternários La-Y-Nb e Mn-Ti-P.....	43
Figura 23	– Diagrama Th/Yb vs. Nb/Y para as amostras de Fortaleza, do <i>neck</i> Pão de Açúcar e do VFN.....	43
Figura 24	– Diagrama de classificação TAS com a representação de 182 amostras de vulcânicas Cenozoicas da região setentrional da PB.....	49
Figura 25	– Planos fatoriais F1/F2, F1/F3 e F1/F4 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para os eixos 1, 2, 3 e 4, com a representação das suplementares Fort, FNor e Mac no plano fatorial F1/F2.....	51
Figura 26	– Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos na primeira AFC.....	53
Figura 27	– Plano fatorial F1/F2 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para os eixos 1 e 2, e a representação das suplementares.....	54
Figura 28	– Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos na segunda AFC.....	55
Figura 29	– Planos fatoriais F1/F2, e F1/F3 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para os eixos 1, 2 e 3.....	56
Figura 30	– Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos na terceira AFC em dois subgrupos de Macau e de Fernando de Noronha.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Coordenadas dos furos amostrados, UTM SIRGAS 2000.....	3
Tabela 2	–	Relação das profundidades das amostras com lâminas delgadas e descrição petrográfica.....	6
Tabela 3	–	Coluna estratigráfica a área de estudo.....	20
Tabela 4	–	Modo de ocorrência e porcentagem visual dos minerais da rocha subaflorante.....	34
Tabela 5	–	Análises químicas dos elementos maiores, traço e norma CIPW das amostras.....	38
Tabela 6	–	Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos.....	50
Tabela 7	–	Contribuição relativa das variáveis suplementares.....	51
Tabela 8	–	Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos na segunda AFC.....	54
Tabela 9	–	Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos na terceira AFC.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFC	Análise Fatorial das Correspondências
BP	Bacia Potiguar
DCC	Domínio Ceará Central
DMC	Domínio Médio Coreaú
DRGN	Domínio Rio Grande do Norte
ETR	Elemento terra rara
Fm	Formação
ICP MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICP OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
Km	Quilômetros
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica
LTB	Lineamento Transbrasiliano
OIB	Ocean Island Basalt
PB	Província Borborema
UTM	Universal Transverse Mercator
VFN	Vulcanismo Fernando de Noronha
VMac	Vulcanismo Macau
VMess	Vulcanismo Messejana
ZCPa	Zona de Cisalhamento Patos
ZCSP	Zona de Cisalhamento Senador Pompeu

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Área de estudo	3
1.4	Material e métodos	5
1.4.1	<i>Revisão bibliográfica</i>	5
1.4.2	<i>Amostragem e descrição macroscópica</i>	5
1.4.3	<i>Laboratório e tratamento de dados</i>	5
1.4.3.1	<i>Petrografia</i>	6
1.4.3.2	<i>Geoquímica</i>	6
1.4.3.3	<i>Análise Fatorial de Correspondências</i>	7
2	GEOLOGIA REGIONAL	10
2.1	Província Borborema	10
2.1.1	<i>Domínio Ceará Central</i>	13
2.2	Bacia Potiguar	13
2.3	Vulcanismo na Província Borborema e adjacências	14
2.4	Formação Barreiras	17
2.5	Sedimentação Quaternária	18
2.5.1	<i>Coberturas colúvio-eluviais</i>	18
2.5.2	<i>Paleodunas</i>	18
2.5.3	<i>Dunas recentes ou móveis</i>	19
2.5.4	<i>Depósitos Flúvio-aluvionares e mangues</i>	19
3	GEOLOGIA LOCAL	20
3.1	Calcário	21
3.2	Vulcânicas	22
3.2.1	<i>Basanito</i>	22
3.2.2	<i>Vulcanoclástica</i>	24
3.3	Formação Barreiras	24
3.3.1	<i>Arenito</i>	25
3.3.2	<i>Siltito arenoso</i>	26
3.3.3	<i>Laterita</i>	27
3.4	Sedimentação Quaternária	27

3.4.1	<i>Paleodunas</i>	27
3.4.2	<i>Sedimentação recente</i>	29
4	PETROLOGIA E GEOQUÍMICA	30
4.1	Métodos	30
4.2	Resultados	31
4.2.1	<i>Petrografia</i>	32
4.2.2	<i>Geoquímica</i>	35
4.2.2.1	<i>Elementos traço</i>	39
4.2.2.2	<i>Abordagem Geotectônica</i>	42
4.3	Discussões – Petrologia e Geoquímica	44
5	ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIAS	47
5.1	Métodos	48
5.2	Resultados	50
5.2.1	<i>AFC 1 – todos os elementos ativos, localização como suplementar</i>	50
5.2.2	<i>AFC 2 – elementos maiores ativos, traço e localização como suplementar</i> ..	53
5.2.3	<i>AFC 3 – elementos traço ativos, maiores e localização como suplementa</i>	55
5.3	Discussões – Análise de Correspondências	57
6	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXO A – OFÍCIO 122/2015/DOS/SEINFRA – CONDIÇÕES DE ACESSO AOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM DA OBRA DA LINHA LESTE DO METRÔ DE FORTALEZA	
	ANEXO B – CONFIRMAÇÃO DE ACEITE DO ARTIGO “AVALIAÇÃO PETROLÓGICA E GEOQUÍMICA DO BASANITO SUBAFLORENTE NO MUNICÍPIO DE FORTALEZA (CE) E SUA CORRELAÇÃO COM O VULCANISMO DE FERNANDO DE NORONHA, BRASIL” PELA REVISTA DE GEOLOGIA	

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação corresponde a um dos pré-requisitos para obtenção do título de Mestre em Geologia pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, cuja linha de pesquisa é Geodinâmica e Recursos Minerais. Serão apresentados e discutidos os resultados dos estudos petrológicos, geoquímicos e estatísticos acerca do enquadramento de um basanita em um dos episódios vulcânicos já conhecidos na região setentrional da Província Borborema (PB).

O trabalho inicia-se com uma visão geral sobre a temática abordada. A seguir são apresentadas as justificativas, os objetivos, a localização da área de estudo, bem como os métodos utilizados. Na sequência, o capítulo 2 discorre sobre a geologia regional e o estado da arte sobre o tema da pesquisa. No capítulo 3 estão sumarizadas as características gerais da geologia local, com base na descrição de furos de sonda. O capítulo 4 apresenta a petrografia e a geoquímica da rocha vulcânica subaflorante, principal objeto de estudo, e será publicado na forma de artigo, no volume 30 (2), de 2017 da Revista de Geologia (UFC). Enquanto que o capítulo 5 trata-se da Análise de Correspondências, um tratamento estatístico multivariado, dos dados químicos e foi submetido na forma de artigo para a revista Geologia USP. Série Científica. O capítulo final foi reservado às considerações finais da pesquisa e suas conclusões.

1.1 Justificativa

Na região Setentrional da Província Borborema (PB) o magmatismo posterior à orogenia de idade Brasiliana e correlacionado à separação do Supercontinente Gondwana com consequente abertura do Oceano Atlântico data desde o Mesozoico. O vulcanismo toleítico que data de 140-120 Ma estaria relacionado ao início do rifteamento na margem sudeste brasileira, outro tipo de vulcanismo, com idades por volta de 90 Ma, é um magmatismo básico e sugere-se estar relacionado a separação efetiva dos continentes com geração de crosta oceânica, e por fim manifestações vulcânicas mais recentes, com idades a partir de 50 Ma, de afinidade básica alcalina, já na fase drifte. Essas ocorrências estão distribuídas na PB, inclusive nas porções *onshore* e *offshore* das bacias Potiguar e Ceará.

A ocorrência de rocha vulcânica que foi investigada está localizada geotectonicamente no chamado Alto de Fortaleza, estrutura esta que limita a bacia Ceará do prolongamento *offshore* da bacia Potiguar, na plataforma continental. Esta ocorrência

acompanha o alinhamento do Atol das Rocas e as rochas do arquipélago de Fernando de Noronha, além de estar relativamente próxima aos fonólitos alcalinos do Vulcanismo Messejana.

Os estudos relacionados ao vulcanismo na região tiveram início no fim da década de 50, tendo um grande avanço a partir da década de 70, quando passaram a utilizar a datação radiométrica para melhor caracterização das ocorrências. Os furos de sonda da Petrobras e o uso da batimetria e da sísmica de reflexão contribuíram amplamente no conhecimento da composição e estruturação das rochas de subsuperfície no continente ou *offshore*. No continente são poucos corpos aflorantes o que também contribuiu para o menor número de trabalho acerca do tema.

A definição da idade e da assinatura geoquímica deste basalto o colocaria como parte integrante de um dos eventos vulcânicos que marcaram a história do processo desde a fase pré-rifte, passando pelo rifteamento que culmina com a fase drifte. Essas informações podem ajudar a esclarecer um pouco mais a evolução das bacias marginais no oceano Atlântico Equatorial e poderão também contribuir para estudos mais profundos sobre o vulcanismo que atuou no continente.

A Bacia Potiguar foi uma grande produtora de óleo e gás no Brasil e a Bacia Ceará é vista como uma fronteira exploratória em potencial, com comprovada ocorrência de óleo. Existem estudos que associam a migração dos hidrocarbonetos com a atividade vulcânica, atuando como reativador tectônico, gerando assim uma nova configuração de armazenamento deste óleo. As atividades vulcânicas também podem ser desencadeadoras de processos hidrotermais relacionados ao enriquecimento de jazidas mineralizadas.

Desta forma, este trabalho justifica-se por se tratar da primeira descrição de uma ocorrência vulcânica em Fortaleza, com dimensões muito maiores do que os diques de tefritos descritos até o momento na região. Além disso, foi possível determinar o tipo de vulcanismo e a quais eventos vulcânicos esse magmatismo está relacionado, como sugerido por Guimarães (1982). Desta forma aprimora-se a compreensão da evolução das bacias marginais adjacentes e as implicações de processos vulcânicos no continente.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar a ocorrência do basanita subaflorante encontrado nos furos de sondagem mista da obra do metrô de Fortaleza, além de relacionar sua ocorrência com o arcabouço estrutural no qual ele está inserido.

Assim pretende-se ter respondido as seguintes perguntas ao final desta dissertação:

- Qual é a caracterização química e petrológica deste basanita subaflorante?
- Qual o ambiente tectônico em que se deu o vulcanismo?
- A qual unidade ele pode ser correlacionado?
- A qual episódio geotectônico ele é relacionado?
- Existiu algum controle estrutural que possa relacionar esta ocorrência com outras conhecidas?

Visando alcançar essas respostas foram realizados estudos petrográficos e geoquímicos a partir do método ICP MS em rocha total, bem como correlações com as ocorrências conhecidas de vulcanismo na região.

1.3 Área de estudo

O basanita pesquisado encontra-se em subsuperfície ao longo da Avenida Santos Dumont, entre a Praça Luiza Távora e a Avenida Barão de Studart (Figura 1), na cidade de Fortaleza capital do Estado do Ceará, e foi detectada por sondagens e geofísica realizadas para a obra da Linha Leste do Metrô do referido município. Fortaleza localiza-se no litoral Atlântico e faz parte da Região Nordeste do Brasil.

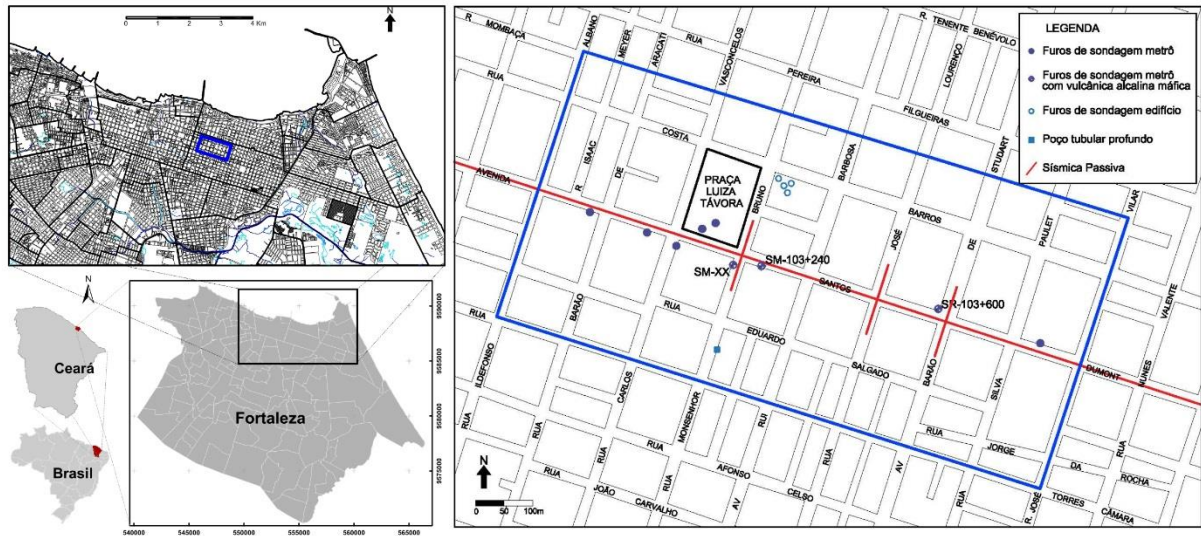
A Praça Luiza Távora localiza-se a exatos 2 km da Catedral Metropolitana de Fortaleza, a partir de onde deve-se seguir pela Rua Governador Sampaio, virar à esquerda na Rua do Pocinho e continuar na Avenida Santos Dumont por 1,7 km. Os furos amostrados, bem como os furos utilizados para a descrição da geologia local estão relacionados na tabela 1, com suas respectivas coordenadas em UTM.

Tabela 1 – Coordenadas dos furos amostrados, UTM SIRGAS 2000

Furo	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
SM-3056	554.207,87	9.587.491,41	23,48
SR-103+020	554.316,34	9.587.452,94	21,70
SM-13	554.346,65	9.587.440,99	22,57
SR-103+160	554.392,58	9.587.452,61	22,20
SM-103+070	554.405,44	9.587.439,44	21,99
SM-3051	554.415,84	9.587.464,23	22,15
SM-XX	554.457,68	9.587.399,03	22,02
SM-103+240	554.483,87	9.587.399,82	22,11
SR-103+600	554.815,36	9.587.311,93	23,79
SM-103+800	554.980,38	9.587.254,08	26,41

Fonte: Governo do Estado do Ceará (dados não publicados).

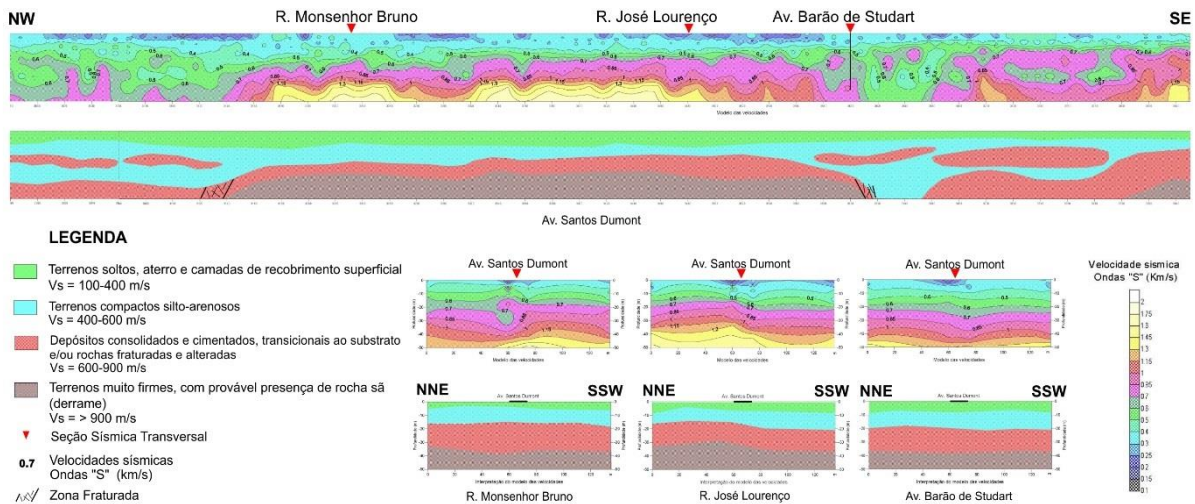
Figura 1 – Localização dos furos de sondagem rotativa da obra do metrô na área de estudo no mapa de Fortaleza



Fonte: elaborada pela autora.

Notas: Área de estudo indicada pelo retângulo azul. Os furos com ocorrência da rocha vulcânica estão identificados pelos nomes (SM-XX, SM-103+240, SM-103+600). Os furos de sondagem SPT de um empreendimento imobiliário, representados como círculos vazados, e um poço tubular profundo, representado por um quadrado cheio, também alcançam o derrame vulcânico. As linhas vermelhas indicam a localização dos perfis de Sismica Passiva Roadside MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) realizada pelo Consórcio Cetenco Acciona.

Figura 2 – Perfil Longitudinal e Perfis Transversais de Sismica Passiva Roadside MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*)



Fonte: Governo do Estado do Ceará (dados não publicados).

Nota: dados levantados pelo Consórcio Cetenco-Acciona.

Entre os estudos para a Obra da Linha Leste do Metrô de Fortaleza foram gerados perfis de Sismica Passiva Roadside MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) como na figura 2. Embora estes dados, não publicados, não estejam tratados é possível identificar o forte contraste entre o corpo vulcânico e os sedimentos subjacentes. As dimensões do corpo

extrapolam os limites dos perfis transversais (SW-NE) e o corpo vulcânico é limitado por duas falhas, uma sob a Praça Luiza Távora e outra sob a Avenida Barão de Studart (Figura 2).

1.4 Material e métodos

Os métodos adotados, que serão descritos na sequência, foram divididos em três etapas: *Revisão bibliográfica*; *Amostragem e descrição macroscópica*; *Laboratório e Tratamento dos dados*. Serão abordados os principais conceitos utilizados e a metodologia das análises realizadas.

1.4.1 Revisão bibliográfica

Nesta etapa foi levantado todo e qualquer material sobre o contexto geológico regional, bem como as pesquisas relacionadas às ocorrências de rochas vulcânicas na região, eventos associados e idades dos vulcanismos conhecidos.

1.4.2 Amostragem e descrição macroscópica

Primeiramente foram descritos todos os furos de sondagem realizados tanto na área de ocorrência do basanita quanto no entorno. Nesta descrição foram observadas características mineralógicas, texturais, estruturais e de contato entre as litologias.

Foram coletadas três amostras de basanita, uma em cada um dos furos nos quais há ocorrência da rocha vulcânica em questão. Na sequência foram confeccionadas lâminas delgadas para a caracterização petrográfica da unidade. Foram enviadas frações de cada uma das amostras para análise química no laboratório Acme. Posteriormente duas amostras do *neck* Pão de Açúcar, pertencente ao Vulcanismo Messejana, juntamente com uma duplicata do furo SM-103+240 foram enviadas ao laboratório SGS Geosol, devido à falta de dados geoquímicos com elementos menores na bibliografia.

1.4.3 Laboratório e tratamento de dados

Neste item são descritos os processos para a identificação petrográfica das amostras, bem como a amostragem e os tratamentos clássicos e estatísticos dos dados geoquímicos.

1.4.3.1 Petrografia

Foram confeccionadas três lâminas delgadas e duas seções polidas, no Laboratório de Laminação da Universidade Federal do Ceará (UFC), essas últimas para identificação dos minerais opacos. Estas lâminas foram descritas a partir da análise em microscópio petrográfico de luz transmitida, modelo NIKON LEICA DM50P do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Departamento de Geologia da UFC, observando-se os aspectos mineralógicos e texturais. Na tabela 2 estão relacionadas as amostras com lâminas e suas respectivas profundidades aproximadas. As paragêneses minerais encontradas e maior detalhamento das amostras serão apresentados no Capítulo 4.

Tabela 2 – Relação das profundidades das amostras com lâminas delgadas e descrição petrográfica

Amostra	Profundidade (m)
SM-XX	38,70
SM-103+240	40,00
SR-103+600	35,00

Fonte: elaborada pela autora.

1.4.3.2 Geoquímica

Para a caracterização geoquímica foram selecionadas as amostras de rocha com o menor grau de intemperismo e livres de contaminação. O primeiro lote foi enviado para o Laboratório Acme, do grupo *Bureau Veritas Minerals* e analisadas pelo método ICP MS para rocha total, cujo pacote comercial recebe o nome de LF200. O segundo lote foi enviado para o Laboratório SGS Geosol, cujo pacote comercial recebe o nome de ICP95A/IMS95A, que analisou os elementos maiores e Ba, V, Zn, Sr e Zr por ICP OES, enquanto os demais elementos foram analisados por ICP MS.

A Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS = *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) e a Espectrometria de Emissão Óptica (ICP OES = *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) são técnicas analíticas usadas para a determinação das quantidades dos elementos químicos em amostras de rocha. Esse tipo de ensaio combina uma fonte de ICP (Plasma por Acoplamento Indutivo), em alta temperatura, que converte o átomo do elemento em uma amostra de íons, que por sua vez são separados e detectados pelo espectrômetro de massa.

O cálculo da Norma CIPW das amostras analisadas foi realizado utilizando-se o software KWare Magma, versão 2.50.0133 de 09/03/2016, desenvolvido por Ken Wohletz do Departamento de Energia (DOE) no Laboratório Nacional de Los Alamos da Universidade da Califórnia nos Estados Unidos.

Os diagramas utilizados para a classificação geoquímica e geotectônica estão citados e referenciados no Capítulo 4, mas ressalta-se que entre eles está o digrama de variação tipo Harker que para Rollinson (1993) é um dispositivo que visa estabelecer alguma relação entre os indivíduos em análise a partir de arranjos simplificados e condensados, mostrando qualitativamente que há, ou não, uma correlação, sendo ela positiva ou negativa, entre cada um dos elementos apresentados com o eixo x. É importante ressaltar o lado qualitativo deste tipo de análise, principalmente tratando-se de elementos maiores, já que seus resultados são dados em % peso. Logo, seus valores correlacionam-se necessariamente de alguma forma.

1.4.3.3 Análise Fatorial de Correspondências

A Análise Fatorial de Dados é um tipo de análise multivariada que tem como objetivo principal explicar a estrutura de covariâncias entre as variáveis de um *conjunto de dados de partida* (Figura 3A) em termos de um menor número de variáveis chamadas de fatores. Cada linha e cada coluna no quadro de dados pode ser tomada como um vetor, ou um ponto, que representa a posição de uma amostra ou de uma variável no espaço.

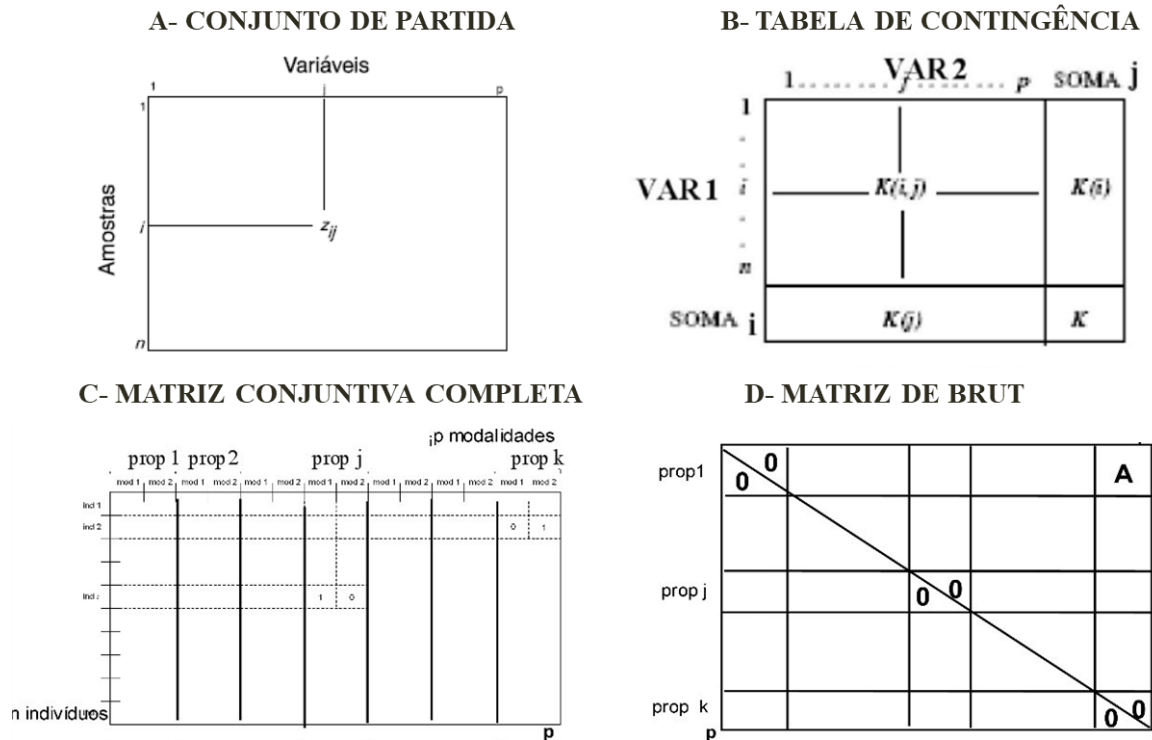
Os métodos fatoriais têm como objetivo encontrar o sistema de eixos que melhor ajusta a nuvem de pontos de determinado conjunto de dados, permitindo desta forma diminuir a dimensão do espaço com a menor perda de informação. Entre estes métodos há a Análise Fatorial das Correspondências (AFC) aplicável exclusivamente a variáveis qualitativas.

Na AFC as variáveis quantitativas e qualitativas de um conjunto de dados podem ser expressas por um código numérico, em uma *tabela de contingência*, que indica a presença de uma certa modalidade (Figura 3B). A partir da tabela de contingência é desenvolvida uma *matriz disjuntiva completa* na qual os dados são descritos de forma binária conforme ilustrado na figura 3C. A multiplicação da matriz disjuntiva completa pela sua matriz transposta nos dá a *Matriz de Burt* ou Matriz Simétrica (Figura 3D). Os eixos fatoriais nos quais serão projetados os indivíduos e as modalidades, de acordo com a fórmula:

$$\int_{i(x)}^j = \sum_{j=1}^p \frac{f_{ij}}{f_i \sqrt{f_j}} u_{\alpha j}$$

são obtidos a partir dos autovalores e autovetores da Matriz de Burt.

Figura 3 – Exemplificação genérica de um conjunto de partida, uma tabela de contingência, uma matriz disjuntiva completa e de uma matriz de Brut



Fonte: Pereira e Sousa (1988).

Notas: A) Em um conjunto de amostras de partida o elemento genérico z_{ij} corresponde ao valor do atributo (variável) j medido na amostra i . B) Esquema de relação entre duas variáveis, onde VAR1 tem n modalidades e VAR2 tem p modalidades. No cruzamento da linha i da VAR1 com a coluna j da VAR2 encontra-se a frequência absoluta de casos $K(i,j)$ em que as duas modalidades ocorrem simultaneamente. C) A matriz disjuntiva completa contém o sinal 1 se a modalidade ocorre no indivíduo e 0 se caso não ocorra. D) A Matriz de Brut é uma matriz simétrica ($p \times p$) que contém todas as tabelas de contingências que cruzam as k propriedades. Na diagonal principal encontra-se o histograma de todas as propriedades.

Em geociências as variáveis podem ser quantitativas, quando por exemplo indicam os valores de análises químicas ou qualitativas, quando indicam uma litologia ou o nome da unidade que representa um dado grupo de rochas. As variáveis quantitativas podem tomar um número infinito de valores numéricos reais, correspondendo normalmente a grandezas medidas, enquanto as variáveis qualitativas podem tomar um número discreto de valores numéricos ou um número finito de categorias ou modalidades.

Os dados geoquímicos são multivariados por natureza (MELLINGER, 1984) já que vários elementos químicos são analisados para inúmeras amostras. Geralmente a relação entre esses elementos químicos não é independente entre si, havendo no conjunto alguma covariância. Portanto, é de se esperar que entre as diferentes amostras também haja covariância

(MELLINGER, 1984) e por isso análises fatoriais multivariadas podem ser uma ferramenta interessante para tratar esse tipo de dado.

A AFC permite analisar tanto os dados geoquímicos, ou seja, os teores de elementos analisados para um conjunto de amostras, bem como características qualitativas, como por exemplo a localização, podendo assim serem analisados simultaneamente diversos conjuntos de rocha de diferentes regiões. A AFC permite ainda a representação simultânea das amostras e das propriedades num espaço conjunto a partir de uma transformação simétrica das linhas (indivíduos) e colunas (variáveis) (VALENCHON, 1982, PEREIRA; SOUSA, 1988; HAIR *et al.*, 2009). A proximidade da projeção dos resultados nos planos fatoriais indica o nível de associação entre as linhas e colunas.

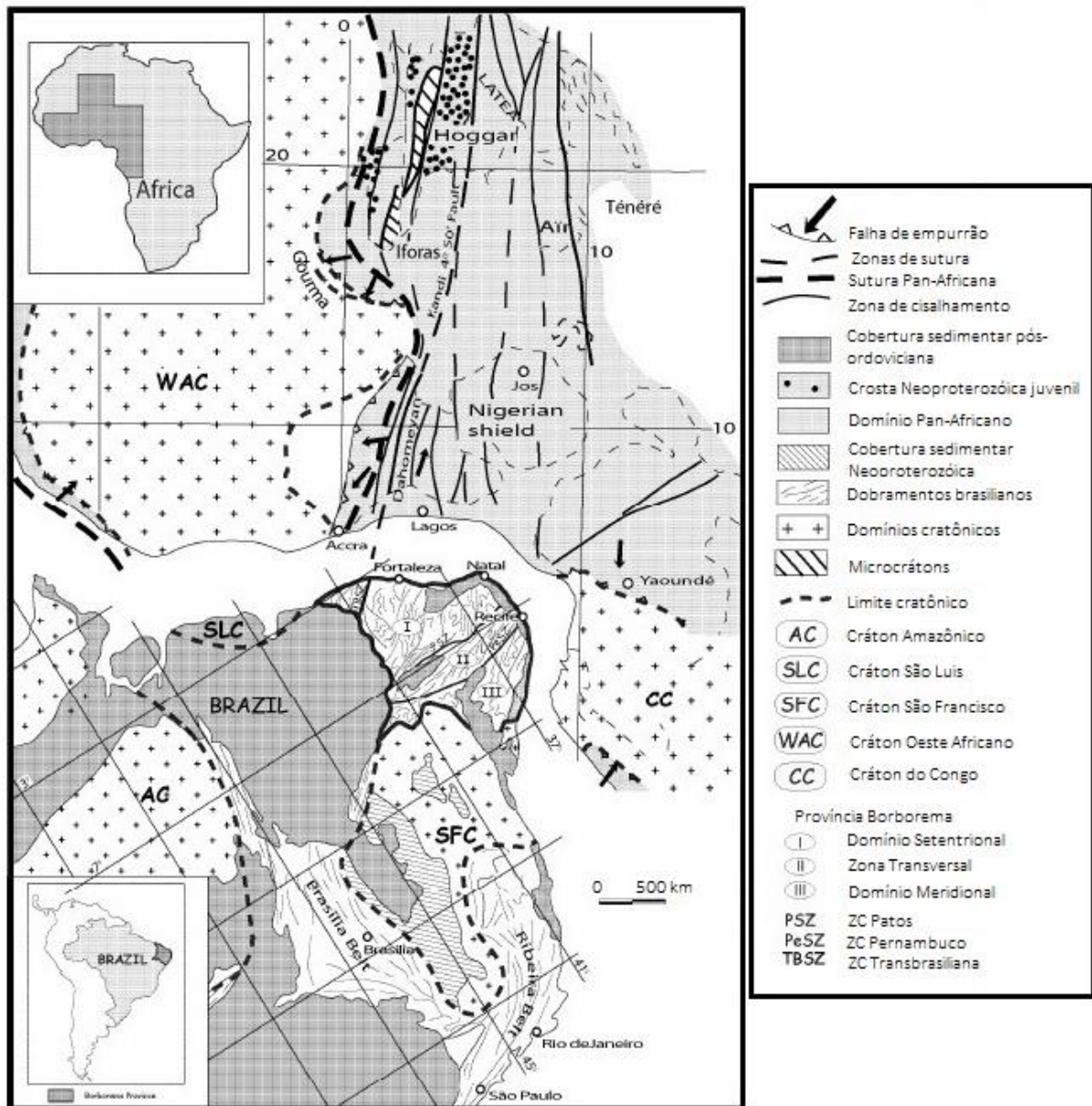
2 GEOLOGIA REGIONAL

A história geológica da região é complexa e marcada por eventos com idades bastante distintas. Blocos Arqueanos, Paleoproterozoicos e Neoproterozoicos deram origem ao substrato da Província Borborema durante a formação do Supercontinente Gondwana no Neoproterozoico. Com a abertura do atlântico, que teve início no final do Jurássico, com eventos importantes no Cretáceo e que perdura até os dias de hoje, processos magmáticos nas bacias do Ceará e Potiguar são associados ao rifteamento e às reativações de falhamentos. As coberturas sedimentares cenozoicas são representadas pelos depósitos paleogenos e neogenos continentais da Formação Barreiras e pelos sedimentos quaternários tais como coberturas colúvio-eluviais, paleodunas, dunas móveis e depósitos flúvio-lacustres.

2.1 Província Borborema

A Província Borborema (PB), definida por Almeida *et al.* (1977) como sendo um cinturão orogenético Neoproterozoico, localiza-se na região nordeste do Brasil e ocupa uma área de aproximadamente 450.000 km² (VAN SCHMUS *et al.*, 1995). A PB é composta pela aglutinação de diferentes “blocos crustais” com idades Arqueana até Neoproterozoica que sofreram deformação durante a formação do Supercontinente Gondwana (e.g. CABY, ARTHAUD, 1986; CABY, 1989; TROMPETTE, 1994), com a convergência e colisão dos Crátons São Luis, Amazônico e São Francisco (Figura 4) há aproximadamente 600 Ma (BRITO NEVES; CORDANI, 1991).

Figura 4 – A Província Borborema no contexto do Supercontinente Gondwana

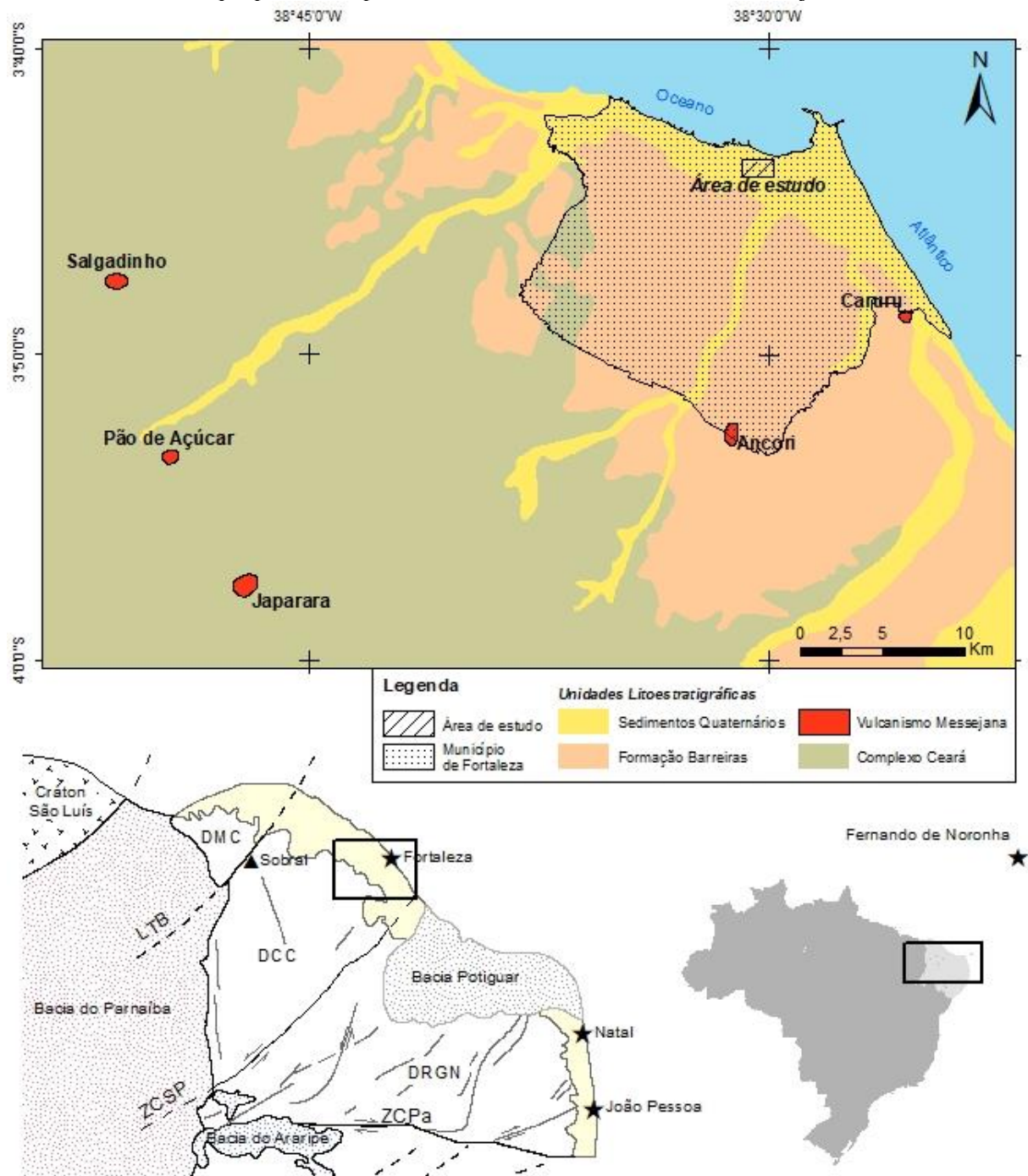


Fonte: modificado de Arthaud (2008).

A PB é subdividida em três subprovíncias (VAN SCHMUS; KOZUCH; BRITO NEVES, 2011) cujos limites são dados por duas zonas de cisalhamento de dimensões continentais: os lineamentos Patos e Pernambuco. A Subprovíncia Setentrional está a norte da Zona de Cisalhamento Patos, a Subprovíncia Transversal está entre as Zonas de Cisalhamento Patos e Pernambuco e a Subprovíncia Meridional, a sul da Zona de Cisalhamento Pernambuco. Há ainda a compartimentação da Subprovíncia Setentrional em três subdomínios (VAN SCHMUS *et al.* (1995), BRITO NEVES; SANTOS; VAN SCHMUS, 2000): 1) Domínio Rio Grande do Norte (DRGN) cujo limite noroeste é o Lineamento Senador Pompeu e a sul é o Lineamento Patos; (2) Domínio Ceará Central (DCC) que limita-se a noroeste pelo Lineamento

Transbrasiliano e a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu; e (3) Domínio Médio Coreaú (DMC) limitado pelo Cráton São Luís a oeste e pelo Lineamento Transbrasiliano a sudeste (Figura 5).

Figura 5 – Esboço geológico da compartimentação da porção Setentrional da Província Borborema, sua relação espacial com o Arquipélago de Fernando de Noronha e Geologia da Região Metropolitana de Fortaleza, com destaque para os corpos alcalinos félsicos do Vulcanismo Messejana



Fonte: modificado de Brandão (1995) e Van Schmus *et al.* (1995).

Notas: LTB = lineamento Transbrasiliano; ZCSP = Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; ZCPa = Zona de cisalhamento Patos; DMC = Domínio Médio Coreaú; DCC = Domínio Ceará Central; DRGN = Domínio Rio Grande do Norte.

2.1.1 Domínio Ceará Central

O DCC limita-se a NW pelo Lineamento Transbrasiliano (zona de cisalhamento Sobral-Pedro II e.g. SANTOS *et al.*, 2001), a SE pela zona de cisalhamento Senador Pompeu, a NE pelo litoral Atlântico e é encoberto a SW-W pelos sedimentos da Bacia do Parnaíba (AMARAL, 2011). Pode ser dividido em quatro unidades geotectônicas (e. g. AUTHAUD *et al.*, 2008; FETTER *et al.*, 2000): (1) Núcleo Arqueano constituído por ortognaisses de composição granodiorítica a tonalítica, complexo máfico a ultramáfico e unidades vulcanosedimentares; (2) Embasamento Paleoproterozoico constituído por ortognaisse e migmatito TTG; (3) Supracrustais de idade Neoproterozoica representada por sequência predominantemente metapelítica, com quartzito, lentes de meta calcário, metavulcânica félsica e anfibolito; e (4) Complexo predominantemente constituído por plutônicas félsicas de alto K (Complexo Tamboril-Santa Quitéria) com grande quantidade de enclaves máficos (ANCELMI *et al.* 2013).

A área de estudo localiza-se na porção litorânea do DCC, na área urbana do Município de Fortaleza. Geologicamente a área possui sedimentos da Formação Barreiras, sedimentos de paleodunas quaternárias e rochas vulcânicas que podem estar relacionadas aos eventos vulcânicos Rio Ceará Mirim, Macau, Fernando de Noronha ou Messejana (ALMEIDA, 2006; ALMEIDA *et al.*, 1988; MIZUSAKI *et al.*, 2002).

2.2 Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar (BP) localiza-se no extremo leste da Margem Equatorial Brasileira (Figura 5), limitando-se a oeste com a Bacia Ceará pelo Alto de Fortaleza, no estado do Ceará, a leste é limitada pelo Alto de Touros, no estado do Rio Grande do Norte. A bacia abrange uma área de aproximadamente 48.000 km², sendo que 26.500 km² (55%) estão submersos e 21.500 km² (45%) encontram-se emersos (PESSOA NETO *et al.*, 2007).

A sedimentação na BP pode ser sumarizada em três superseqüências distintas: Rifte, Pós-rifte e Drifte. A Superseqüência Rifte, depositada no Cretáceo Inferior, é representada pelas Formações Pendência e Pescada com depósitos flúvio-deltaicos e lacustres. A Superseqüência Pós-rifte, depositada durante o Andar Alagoas, é composta pela Formação Alagamar que se caracteriza pela deposição de uma seqüência flúvio-deltáica onde estão os primeiros registros de ingressão marinha. Por fim a Superseqüência Drifte, depositada entre o Albiano e o Recente, composta por uma seqüência flúvio-marinha transgressiva representada

pelas Formações Açu, Ponta do Mel, Quebradas, Jandaíra e Ubarana, recobertas por uma sequência clástica e carbonática regressiva representadas pelas Formações Ubarana, Tibau, Guamaré. Três eventos magmáticos principais são identificados na Bacia Potiguar: Rio Ceará Mirim, Cuó e Macau (ARARIPE; FEIJÓ, 1994; PESSOA NETO *et al.*, 2007).

Apesar da BP não ocorrer na área de estudo o entendimento da sua evolução é de suma importância para a compreensão do contexto regional, com eventos vulcânicos de diversas idades que serão apresentados na sequência.

2.3 Vulcanismo na Província Borborema e adjacências

A Província Borborema passou por diversos eventos magmáticos intrusivos e extrusivos. Este trabalho ater-se-á aos registros a partir do Jurássico Superior, que são relativamente bem documentados (ALMEIDA 1986; ALMEIDA, 2006; ALMEIDA *et al.*, 1988; GOMES *et al.*, 1981; MIZUSAKI *et al.*, 2002; RODRIGUES, 1976; SCHOBENHAUS *et al.* 1984) e indicam que a região passou por períodos atividade magmática intensa e alguns períodos de calma.

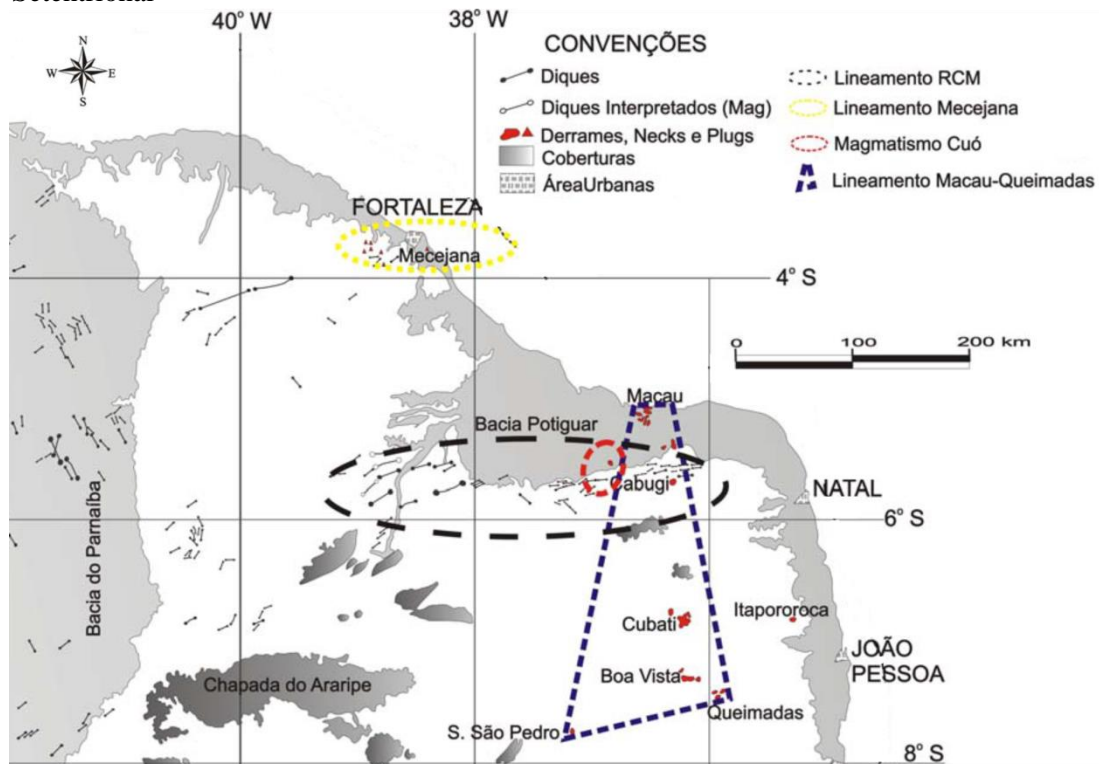
O processo que originou o vulcanismo da região Nordeste do Brasil ainda não está totalmente caracterizado e compreendido. A possibilidade do *hotspot* Fernando de Noronha (ALMEIDA, 1986; ALMEIDA, 2006; CHANG *et al.* 1992; DAVIES, 1988; MIZUSAKI *et al.*, 2002) ativo a partir do Cenozoico foi defendida por muito tempo. Entretanto, Rivalenti *et al.* (2000) e Rivalenti *et al.* (2007) consideraram, a partir do estudo de xenólitos, que a origem do Vulcanismo Fernando de Noronha estaria relacionada a plumas mantélicas. Ambas as hipóteses são confrontadas pela distribuição geométrica deste vulcanismo e inexistência de uma anomalia geofísica no manto inferior (MONTELLI *et al.*, 2006; RISTEMA *et al.*, 1999). Ernesto (2005) questiona a partir da reconstituição paleomagnética da plataforma brasileira, a geometria típica de um *hotspot*, entretanto para Almeida (2006) essa possibilidade não poderia ser descartada, já que Anderson (2000) e Courtillot *et al.* (2003) consideraram que a pluma geradora de um *hotspot* pode ocorrer no manto superior.

Almeida *et al.* (1988) e Sleep (2003) defenderam que este tipo de vulcanismo estaria relacionado à reativação de falhas e zonas de cisalhamento, o que corrobora a teoria de Anderson (2005) na qual não seria necessária a presença de uma pluma quente e, sim, uma heterogeneidade química para a fusão no manto superior e que esta heterogeneidade pode ser gerada como resultado de processos tectônicos, pois a descompressão devido a falha profunda pode também levar a fusão mantélica. Para King e Anderson (1998) e Vogt (1991) é

considerada a possibilidade destes eventos magmáticos estarem relacionados a um fluxo convectivo de menor escala gerado por contrastes térmicos associados à movimentação da litosfera mais fina. King (2007), King e Ristema (2000) e Knesel *et al.* (2010) colocaram o vulcanismo de Fernando de Noronha, entre outros, como propícios candidatos à convecção de borda, devido à sua geometria e localização.

Entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte Mizusaki *et al.* (2002) individualizaram três eventos magmáticos de idades distintas (Figura 6): (1) o magmatismo toleítico, de 120-140 Ma; (2) o magmatismo, de 90 Ma, que representa efetivamente a separação Brasil-África e (3) o magmatismo alcalino mais novo do que 50 Ma.

Figura 6 – Localização dos vulcanismos Meso-Cenozoicos da Província Borborema Setentrional



Fonte: modificada de Silveira (2006).

O Magmatismo Rio Ceará-Mirim (GOMES *et al.*, 1981; MARTINS *et al.*, 1989) representa uma grande atividade magmática contínua do Jurássico Inferior ao Cretáceo Inferior e precede a abertura do Atlântico Equatorial. São diques de olivina basalto e diabásio de direção E-W na borda da Bacia Potiguar e direção NE-SW na porção centro-oriental do Estado do Ceará. Araripe e Feijó (1994) apresentaram datações entre 120 e 140 Ma, já Oliveira, D. C (1998) considera que os picos de atividade foram entre 130 a 145 Ma.

O segundo evento magmático descrito na região é relativo à Formação Serra do Cuó, de caráter intraplaca, cujos diabásios apresentam idades entre 85 e 90 Ma (OLIVEIRA, D. C. 2000). Souza *et al.* (2003) encontraram uma idade de $93,1 \pm 0,8$ Ma. Este evento é definido com base em afloramento na borda sul da Bacia Potiguar, no entanto Condé *et al.* (2007) identificaram esse evento em águas profundas da Bacia Ceará, onde um diabásio cuja idade pelo método K-Ar foi de 83 Ma.

O terceiro evento de idades entre $7,1 \pm 0,1$ e 45 Ma (MIZUSAKI *et al.*, 2002; OLIVEIRA, D. C., 1998; SILVEIRA, 2006; KNESEL *et al.* 2010) é o Magmatismo Macau. Ele é caracterizado pelo alinhamento Macau-Queimadas de direção N-S e sugerem extensão crustal E-W. Além das ocorrências na porção emersa da BP este vulcanismo também ocorre em sua porção submersa. Condé *et al.* (2007) enfatizam que através de datações é possível localizar correspondências deste magmatismo na Bacia Ceará.

O vulcanismo descrito na extensão continental da Zona de Fratura Fernando de Noronha – ZFFN – (GOMES *et al.*, 2000; GORINI; BRYAN, 1974) é denominado Vulcanismo Messejana, grafado como Mecejana por Vandoros e Oliveira (1968). O Vulcanismo Messejana (ALMEIDA *et al.*, 1988; VANDOROS; OLIVEIRA, 1968) é restrito ao estado do Ceará e suas maiores representações emersas e aflorantes são o domo fonolítico de Cararu (VANDOROS; OLIVEIRA 1968) e o *neck* de alcalifonólito Pão de Açúcar. O primeiro foi datado por Cordani (1970) com idade de $29,9 \pm 0,9$ Ma e o segundo foi datado por vários autores (BRASIL, 1981; CORDANI, 1970; GUIMARÃES; SIAL; TEIXEIRA; TASSINARI; SIGA JR., 1978) que apresentaram idades entre 36 ± 2 e $29,9 \pm 0,9$ Ma. Almeida (2006) destaca que este vulcanismo é constituído por uma dezena de plugs e domos de rochas alcalifonolíticas, tefríticas e fonotefríticas, piroclastos locais e inúmeros diques alcalinos. Mizusaki *et al.* (2002) reportaram datações de rochas nas áreas do Alto do Ceará, com 44 Ma, e da Plataforma Fortaleza, com 32-34 Ma, ambas na região submersa da Bacia Ceará. Dados de furos da Petrobras, datados por Thomaz Filho (1983) com idade de 32 ± 1 Ma, indicaram rochas vulcânicas efusivas, descritas como basaltos, acima das camadas cretáceas na sub-bacia de Mundaú.

Para Almeida (2006) o pequeno distrito magmático Messejana corresponderia ao mesmo vulcanismo que deu origem ao Arquipélago de Fernando de Noronha e a cadeia de montanhas submarinas adjacentes (Atol d Rocas), que se alinham em um *trend* E-W. O arquipélago localiza-se a cerca de 360 km da costa, a leste (Figura 5). Embora o Vulcanismo Fernando de Noronha não esteja inserido na Província Borborema suas características precisam ser mencionadas. Este vulcanismo foi individualizado em duas grandes formações, Remédios e Quixaba, e uma formação menos expressiva, denominada São José, por Almeida (1955),

posteriormente datadas por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ com idades entre $12,5\pm 0,1$ e $9,4\pm 0,2$ Ma, $6,2\pm 0,1$ até $1,3\pm 0,1$ Ma e $9,2\pm 0,5$ a $9,0\pm 0,1$ Ma, respectivamente (PERLINGEIRO *et al.* 2013). Descrições petrográficas e geoquímicas das rochas do arquipélago Fernando de Noronha foram feitas por Ulbrich (1993), Lopes (2002) e Lopes e Ulbrich (2015), entre outros.

O mapeamento geológico da CPRM (Brandão, 1994) na região metropolitana de Fortaleza é o trabalho mais recente e que individualiza o maior número de corpos vulcânicos próximo à Capital, além disso ele individualiza as unidades Cenozoicas, como mostra a figura 5.

2.4 Formação Barreiras

A Formação Barreiras é composta por sedimentos parcialmente litificados que ocorrem ao longo do litoral brasileiro a partir do Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Pará. Já foi designada como série, formação e grupo (SOUSA, 2002). Hoje o termo mais aceito é formação devido à grande dificuldade de subdividi-la.

A formação foi denominada por Branner (1902) *apud* Sousa (2002) e já foi objeto de estudo de diversos pesquisadores, destacando-se o caráter descritivos destes trabalhos onde o principal enfoque foram os aspectos geomorfológicos, litológicos e texturais. A partir da década 80 estudos tentam caracterizá-la tendo em vista o trato de sistemas, ou seja, o reconhecimento de processos sedimentares envolvidos e a reconstrução da evolução dos sistemas deposicionais (ALHEIROS *et al.*, 1988).

O ambiente deposicional consensualmente aceito é um sistema fluvial entrelaçado, associado com leques aluviais e depósitos litorâneos (ALHEIROS *et al.*, 1988; ALHEIROS E LIMA FILHO, 1991 *apud* SOUSA, 2002), de caráter predominantemente continental, onde os sedimentos foram depositados sob condições de clima árido, chuvas esporádicas e violentas, além de um nível do mar mais baixo do que o atual (BIGARELLA, 1975 *apud* BRANDÃO, 1998).

Segundo Brandão (1998) a formação distribui-se ao longo do litoral cearense, com largura e espessura variáveis. Ela é formada por sedimentos areno-argilosos pouco litificados, de cor vermelha, creme ou amarela, geralmente de textura mosqueada, grãos mal selecionados, granulometria fina a média e matriz argilosa a caulínica, com cimento argilo-ferruginoso e as vezes silicoso. Localmente encontram-se níveis lateríticos e horizontes conglomeráticos. Seus clastos são normalmente de quartzo e raramente de feldspato, laterita e outros tipos de rocha, de tamanhos variados, podendo atingir 10 centímetros.

A idade da formação é um tópico controverso e Sousa (op cit.) apresentou diversos trabalhos que não entram em consenso sobre o tema. A única afirmação não divergente é que essas idades nunca seriam mais velhas do que o Eoceno, sendo que é no Neógeno onde a maioria delas estão posicionadas. Lima *et al.* (2007) afirmaram que os sedimentos da Fm Barreiras na porção Setentrional da PB estavam depositados e intemperizando há pelo menos cerca de 17 Ma a partir de datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e (U-Th)/He em óxidos de manganês e goetita autigênica, respectivamente. Para estes mesmos autores a idade máxima de deposição dos sedimentos da Formação Barreiras seria aproximadamente 22 Ma, idade sugerida a partir da datação de pisólitos detríticos.

2.5 Sedimentação Quaternária

A Sedimentação Quaternária na região é composta por coberturas colúvio-eluviais, paleodunas, dunas recentes depósitos flúvio-aluvionares e mangues. Cada uma dessas unidades será descrita na sequência.

2.5.1 Coberturas colúvio-eluviais

São sedimentos distribuídos irregularmente, assentados diretamente sobre as rochas Proterozoicas ou sobre as rochas da Formação Barreiras, cuja espessura não ultrapassa três metros. Oliveira, J. F. (1998) enfatizou que muitas vezes são confundidos com os sedimentos da Fm Barreiras. Estes sedimentos são descritos em Brasil (1981) como material cuja matriz é areno-argilosa, com detritos de granulometria grossa, cor variegada, inconsolidado, mal classificado e que sofreram pouco transporte, o que indica rochas fontes locais.

2.5.2 Paleodunas

Esta unidade é composta por sedimentos normalmente inconsolidados, com certo grau de compactação em alguns locais, compostos por areia quartzosa e/ou quartzo-feldspática, bem selecionada, de granulometria fina a média, por vezes siltosa, tons amarelados, alaranjados e acinzentados, distribuídos em faixas ao longo da linha de costa. Estão estratigraficamente sobre os sedimentos da Formação Barreiras e podem estar cobertos pelas dunas móveis ou recentes, geralmente tem vegetação associada e pode chegar a 15 metros de espessura (BRANDÃO, 1998).

2.5.3 *Dunas recentes ou móveis*

Segundo Oliveira, J. F. (1998) as dunas recentes são o produto da deposição das areias de praia transportadas pelo vento, formam um cordão contínuo paralelo à linha de costa. São compostas por areias quartzosas brancas, bem selecionadas, de granulometria fina a média, grãos de quartzo foscos e arredondados, por vezes com níveis de minerais pesados. Caracterizam-se pela ausência de vegetação, podem atingir até 30 metros de espessura e possuem estratificação cruzada.

2.5.4 *Depósitos Flúvio-aluvionares e mangues*

São sedimentos fluviais, lacustres e estuarinos recentes, que ocorrem ao longo das principais drenagens e são o produto do intemperismo e sedimentação das unidades litológicas existentes. Caracterizam-se por serem depósitos mal selecionados, compostos por areias, cascalhos, siltes e argilas, podendo ou não conter matéria orgânica (BRANDÃO, 1998; OLIVEIRA, J. F.,1998).

3 GEOLOGIA LOCAL

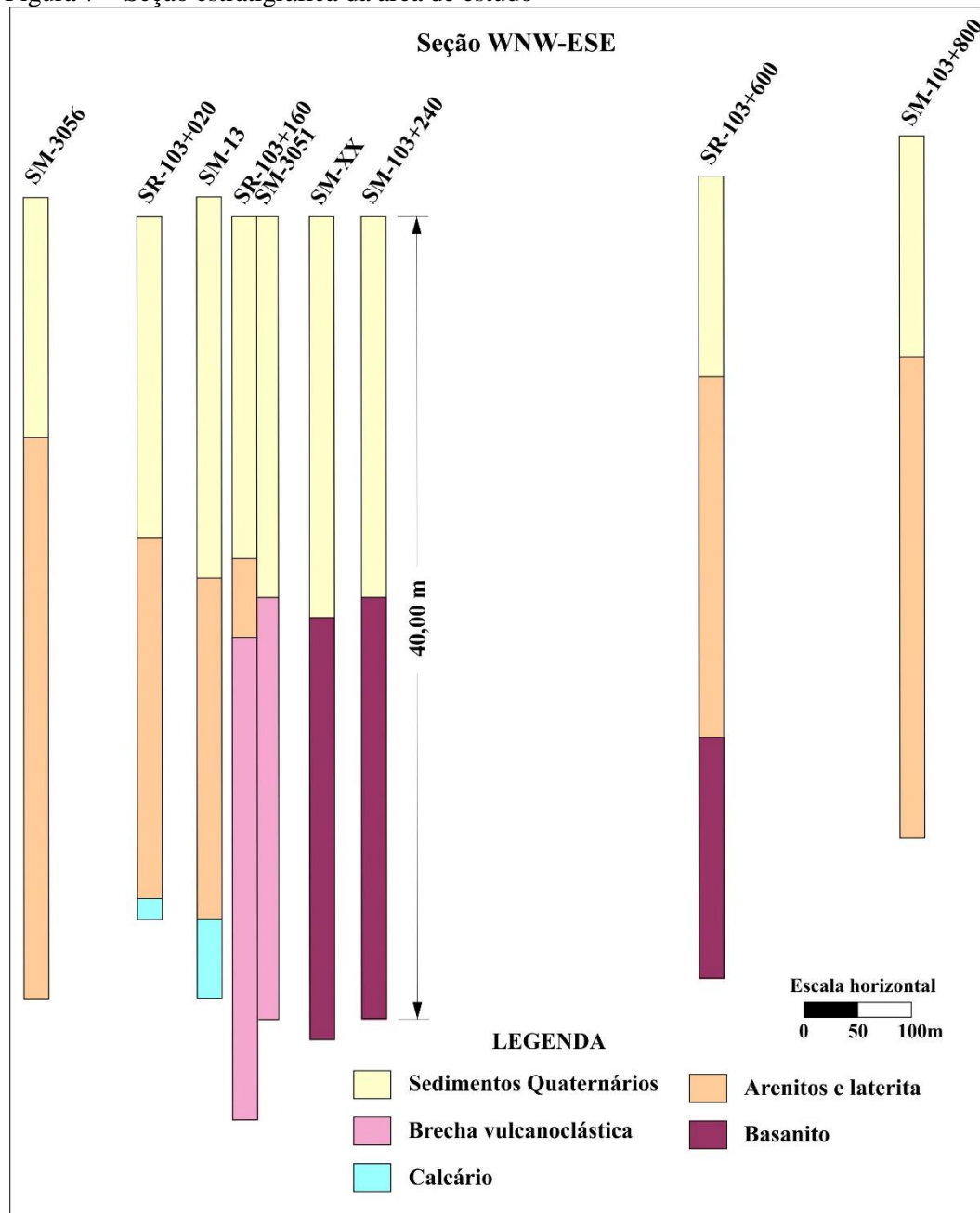
Devido à falta de afloramentos e à intensa urbanização no município de Fortaleza a maneira mais eficiente para se obter informações geológicas consistentes é a partir de sondagens rotativas associadas à métodos geofísicos. Com base na descrição dos furos de sondagens (Tabela 1) que estão a no máximo 300 metros do limite de ocorrência da rocha vulcânica (Figura 1) foi construída a coluna estratigráfica apresentada na tabela 3. As altitudes dentro da área de estudo variam entre 22 e 26 metros em relação ao nível do mar. Conforme pode ser observado na figura 7, além da rocha vulcânica também são interceptadas rochas sedimentares da Formação Barreiras e sedimentos Quaternários inconsolidados. Na sequência são descritas as unidades individualizadas da base para o topo.

Tabela 3 – Coluna estratigráfica a área de estudo

Unidade	Litotipo	Material
Sedimentação Quaternária	Sedimentação recente	Areia quartzítica, fina a média, com silte, bege amarronzada.
	Paleoduna	Areia quartzítica, fina a média, branca a amarelada
Formação Barreiras	Laterita	Fragmentos de quartzo com película de óxidos e hidróxidos, areia fina, argila e silte, cor vermelha a laranja com porções ocre.
	Siltito arenoso	Silte, com areia fina a média e alguma argila, quartzo até tamanho grânulo. Predominam cores claras tais como bege, branco, amarelo acinzentado ou cinza esverdeado e níveis amarronzados. Parcialmente litificado.
	Arenito	Arenito de granulometria que varia de areia fina a grossa, matriz silte e areia muito fina, por vezes com níveis conglomeráticos. Coloração variada.
Vulcânica	Basanito	Rocha afanítica de cor preta a cinza escuro, maciça, raramente com amídalas preenchidas, bastante densa e magnética.
	Brecha vulcanoclástica	Rocha intensamente saprolitizada, é granular, com argila na cor ocre, sem ou com raro quartzo, essencialmente argilizadas, com fragmentos de outras rochas de bordas irregulares, similar a uma brecha.
	Calcário	Wackestone maciço, com variação gradacional centimétrica para textura granular, coloração cinza e níveis de lama carbonática pulverulenta

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 7 – Seção estratigráfica da área de estudo



Fonte: elaborada pela autora.

Notas: as escalas horizontal e vertical são gráficas independentes. A localização destes furos se encontra na figura 1.

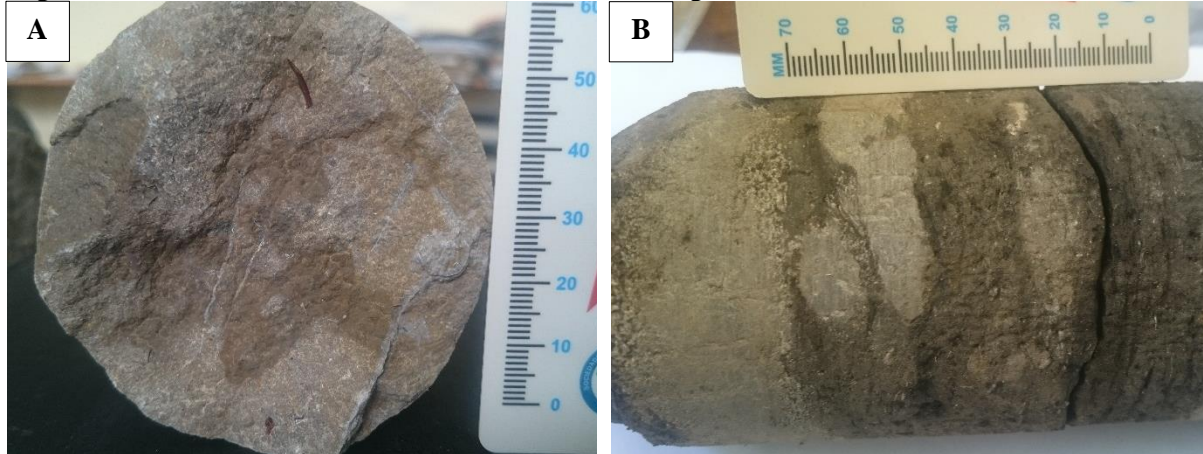
3.1 Calcário

O calcário ocorre a partir dos 34,00 metros de profundidade nos furos SR-103+200 e SM-13, sendo que nenhum dos furos atinge mais do que 40,00 metros. Seu contato superior é com siltitos Fm. Barreiras.

Este litotipo é maciço, com variação gradacional centimétrica para textura granular, coloração cinza, granulometria entre 0.5 e 1 mm, com bioclastos (Figura 8 A) visíveis a olho

nu: conchas bivalves (maior eixo 0.5 a 1.0 cm). Localmente ocorrem níveis centimétricos de lama carbonática preta e pulverulenta (Figura 8 B). Microfraturas fechadas preenchidas ora por material branco, ora por material alaranjado. Sem evidência de inversão granulométrica e nenhum indicativo de bioturbação aparente. Rocha aloquímica, calcilutito a calcarenito. Pela classificação de Dunham (1962) seria um wackestone.

Figura 8 – Calcário encontrado nos testemunhos de sondagem



Fonte: objetos da pesquisa.

Notas: A) Calcário com bioclastos do furo SR-103+020 (UTM 554.316,34 E; 9.587.452,94 S) a 34,10 metros de profundidade; B) Intercalação de calcário maciço e lama carbonática pulverulenta aos 38,70 metros de profundidade do furo SM-13 (UTM 554.346,65 E; 9.587.440,99 S).

3.2 Vulcânicas

Nos furos foram encontrados dois litotipos ígneos, um basanito e uma vulcanoclástica bastante intemperizada, sendo o primeiro o foco principal desta dissertação. Ambos serão descritos na sequência e informações mais detalhadas a respeito do basanito, sua petrografia e dados geoquímicos podem ser encontradas no capítulo 4 deste volume.

3.2.1 *Basanito*

O basanito ocorre nos furos SM-XX, SM-103+240 e SR-103+600, também foi identificado em sondagens SPT de simples reconhecimento em um empreendimento imobiliário e durante a perfuração de um poço tubular profundo na região. Sua ocorrência se dá em média aos 20 metros de profundidade e sua espessura, embora não possa ser determinada apenas pelos dados existentes até o momento, certamente é maior do que 20 metros. Estima-se que ocupe uma área em torno de 400 por 320 metros.

O litotipo encontrado nos furos de sondagem uma rocha vulcânica, afanítica, cinza escuro, bastante densa e magnética, predominantemente maciça (Figura 9A), mas com presença de amígdalas parcialmente preenchidas por calcita (Figura 9B). Quando sã esta rocha tem cor preta a cinza escuro e quando saprolitizada, em média nos primeiros 2,5 metros do topo da unidade, é composto por argila, silte e pequenos fragmentos da própria rocha, de cor cinza esverdeado com porções ocre (Figura 9C), sendo possível observar-se foliação esferoidal. A rocha é fraturada (Figura 9D), com predomínio de fraturas fechadas preenchidas por calcita ou por material oxidado.

Figura 9 – Feições macroscópicas características do basanita



Fonte: objetos da pesquisa.

Notas: A) Testemunho do furo SM-103+240 (UTM 554.483,87 E; 9.587.399,82 S) aos 30,00 metros de profundidade; B) Detalhe de vesícula parcialmente preenchida por calcita a 39,80 do furo SM-XX (UTM 554.457,68 E; 9.587.399,03 S); C) Material retirado do ensaio SPT do furo SM-XX entre 20,00 e 20,27 m de profundidade; D) As fraturas nas porções mais preservadas da unidade, testemunho SM-103+240 a 29,60 m.

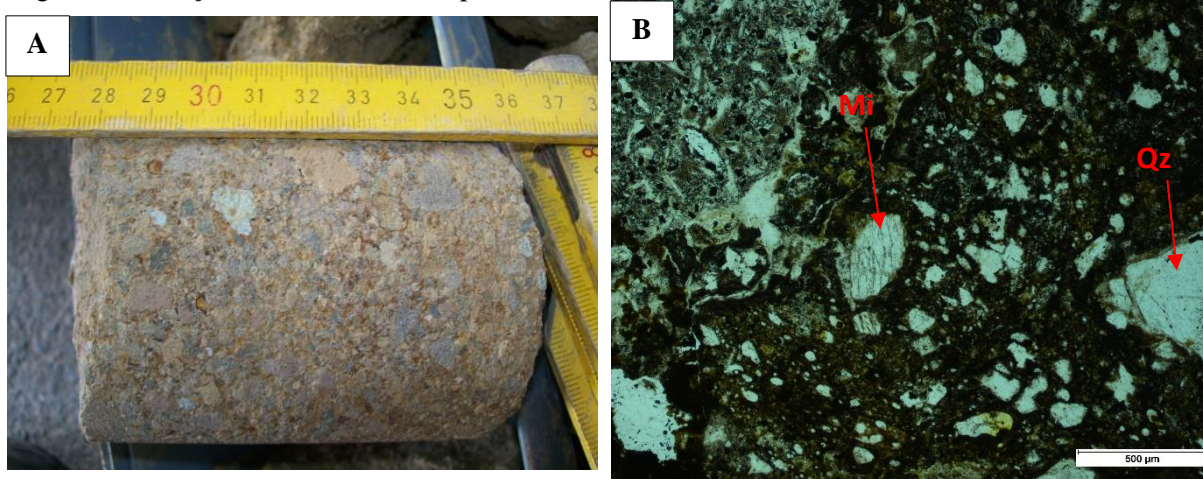
O topo desta unidade está em contato com arenitos e siltitos da Fm Barreiras, na porção leste da ocorrência, e com as areias das chamadas paleodunas, a partir de sua porção

central para o oeste. Nenhuma das unidades adjacentes apresenta sinais de metamorfismo de contato.

3.2.2 Vulcanoclástica

Nos furos SR-103+160 e SM-3051, localizados na Praça Luiza Távora, a partir dos 20,50 metros de profundidade ocorre uma rocha intensamente saprolitizada. Esta rocha é granular, com argila na cor ocre, sem ou com raro quartzo, essencialmente argilizadas, com fragmentos de outras rochas de bordas irregulares, similar a uma brecha (Figura 10A). Em lâmina identificam-se fragmentos de vidro vulcânico, rochas ígneas com olivina e rochas do embasamento, apesar do alto grau de intemperismo deste litotipo (Figura 10B).

Figura 10 – Feições macro e microscópicas da vulcanoclástica



Fonte: objetos da pesquisa.

Notas: A) Brecha vulcanoclástica aos 44,90 metros do furo SR-103+160 (UTM 554.392,58 E; 9.587.452,61 S); B) Microfotografia de rocha ígnea com cristais de relevo alto (olivina, feldspato), opacos (magnetita), com matriz fina e oxidada (canto superior esquerdo) e rocha parcialmente devitrificada com de fragmentos de quartzo (Qz) e microclina (Mi) em meio a outros fragmentos.

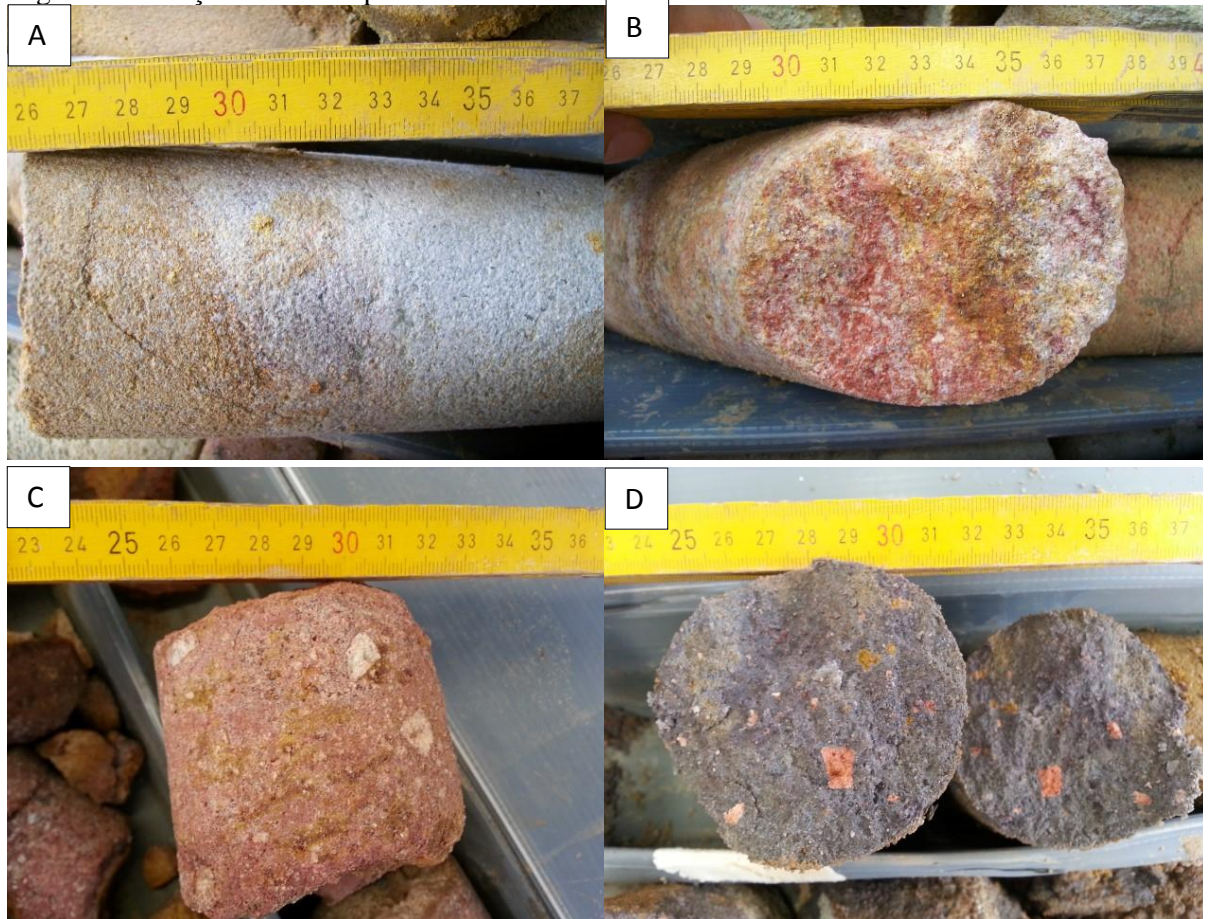
3.3 Formação Barreiras

A Formação Barreiras neste contexto é composta por arenitos, siltitos arenosos e lateritas que ocorrem nos furos SM-3056, SR-103+020, SM-13, SR-103+160, SR103+600 e SM-103+800. No topo desta formação estão as paleodunas e na base, quando atingida, estão o calcário e as rocha vulcânicas, todos com contatos bruscos.

3.3.1 Arenito

O arenito mal selecionado, cuja granulometria varia de areia fina a grossa, matriz silte e areia muito fina (Figura 11A e B), e por vezes ocorrem níveis conglomeráticos. Ele possui cores variadas que vão de branca a vermelha com porções ocre, laranja, amarela e roxo acinzentado e que se intercalam sem um padrão. Nos níveis conglomeráticos os clastos são mal selecionados, compostos por grãos de quartzo e feldspato, além de fragmentos de arenito, que variam de grânulo a seixo, geralmente subangulosos a angulosos e de baixa esfericidade (Figura 11 C e D).

Figura 11 – Feições macroscópicas do arenito da Fm. Barreiras



Fonte: objetos da pesquisa.

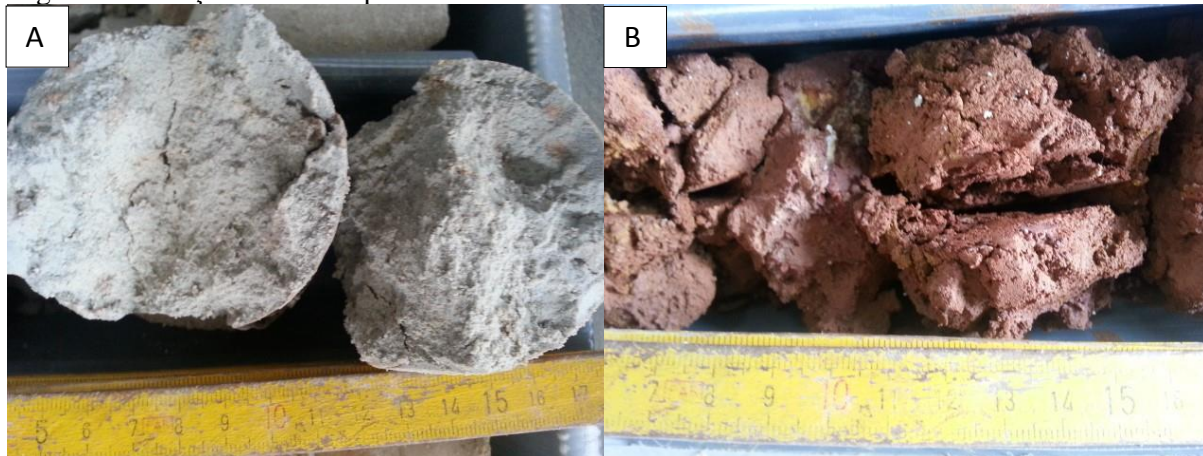
Notas: A) Arenito branco amarelado, mal selecionado, de granulometria fina a média, matriz siltosa, testemunho do furo SM-3056 (UTM 554.207,87 E; 9.587.491,41 S) a 37,90 m de profundidade; B) Variação da coloração do arenito aos 38,30 m do furo SM-3056; C) Arenito vermelho, mal selecionado de granulometria grossa, matriz siltosa e clastos tamanho grânulo a seixo pequeno, angulosos de quartzo no furo SM-103+800 (UTM 554.980,38 E; 9.587.254,08 S) aos 13,30 m; D) Arenito de cor roxa, granulometria média a grossa, matriz silte a areia fina, porções conglomeráticas com clastos subangulosos, de baixa esfericidade, tamanho grânulo e seixo de quartzo, feldspato e de arenito vermelho no furo SM-103+800 aos 29,15 m.

Nos furos estudados o arenito sempre faz contato de topo com o siltito arenoso e está presente nos furos fora do limite do corpo vulcânico. Sua espessura máxima nos furos é de 16 metros e com as informações disponíveis não é possível definir como se dá seu contato basal.

3.3.2 *Siltito arenoso*

O siltito arenoso é fracamente litificado, predominantemente siltoso, com areia fina a média, e alguma argila, pode ter grãos de quartzo de tamanho grânulo (Figura 12A). Predominam cores claras como bege, branco ou amarelo acinzentado, mas também níveis amarronzados (Figura 12B) e cinza esverdeados. Podem conter níveis lateríticos dessimétricos a métricos.

Figura 12 – Feições macroscópicas do siltito arenoso da Fm. Barreiras



Fonte: objetos da pesquisa.

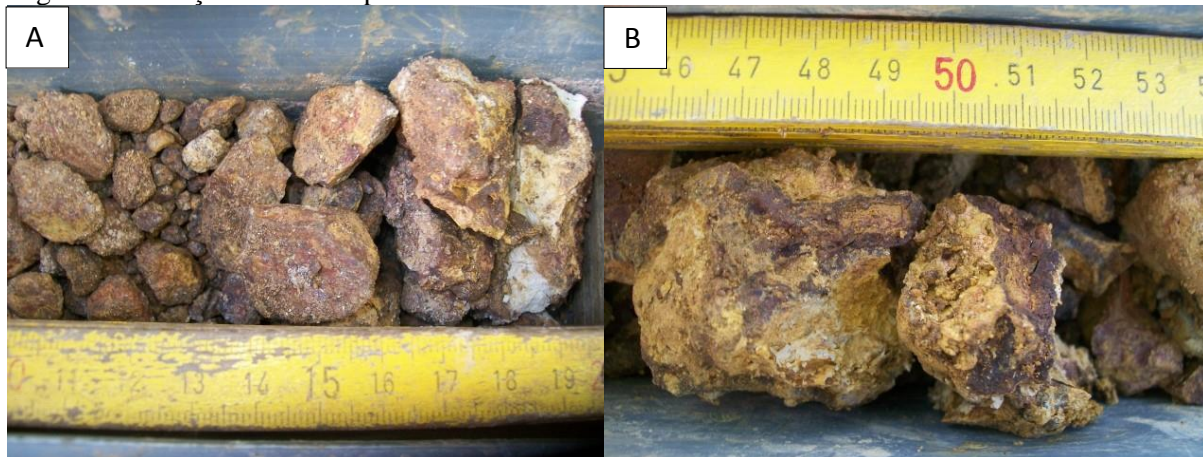
Notas: A) Siltito arenoso branco acinzentado aos 12,75 m de profundidade do furo SR-103+600 (UTM 554.815,36 E; 9.587.311,93 S); B) Nível silto argiloso marrom avermelhado na camada de siltito arenoso do furo SR-103+600 aos 19,40 m.

Este litotipo ocorre a leste e a oeste do corpo vulcânico, logo abaixo da camada de paleoduna com a qual o contato é brusco. Sua espessura varia entre 6,50 a 16 metros, entretanto quando se considera suas intercalações com a laterita essa espessura chega a 21,50 metros, podendo também estar intercalado com camadas de arenito no extremo leste. O contato basal mais comum é com o arenito.

3.3.3 Laterita

Os níveis lateríticos tem pouca continuidade lateral e ocorrem geralmente associados ao siltito arenoso. Esta laterita é composta por fragmentos de quartzo com película de óxidos e hidróxidos, areia fina, argila e silte, cor vermelha a laranja e porções ocre (Figura 13A e B).

Figura 13 – Feições macroscópicas da laterita da Fm. Barreiras



Fonte: objetos da pesquisa.

Notas: A) Fragmentos de laterita do furo SM-3056 (UTM 554.207,87 E; 9.587.491,41 S); B) Detalhe em fragmento laterizado aos 27,10 m de profundidade do furo SM-3056

Sua ocorrência se dá a partir dos 18 metros de profundidade e sua maior espessura registrada é de 8,5 metros. Com base nos dados de sondagem e geofísica esta laterita corre na forma de lentes dentro do siltito, predominantemente a oeste do basanita.

3.4 Sedimentação Quaternária

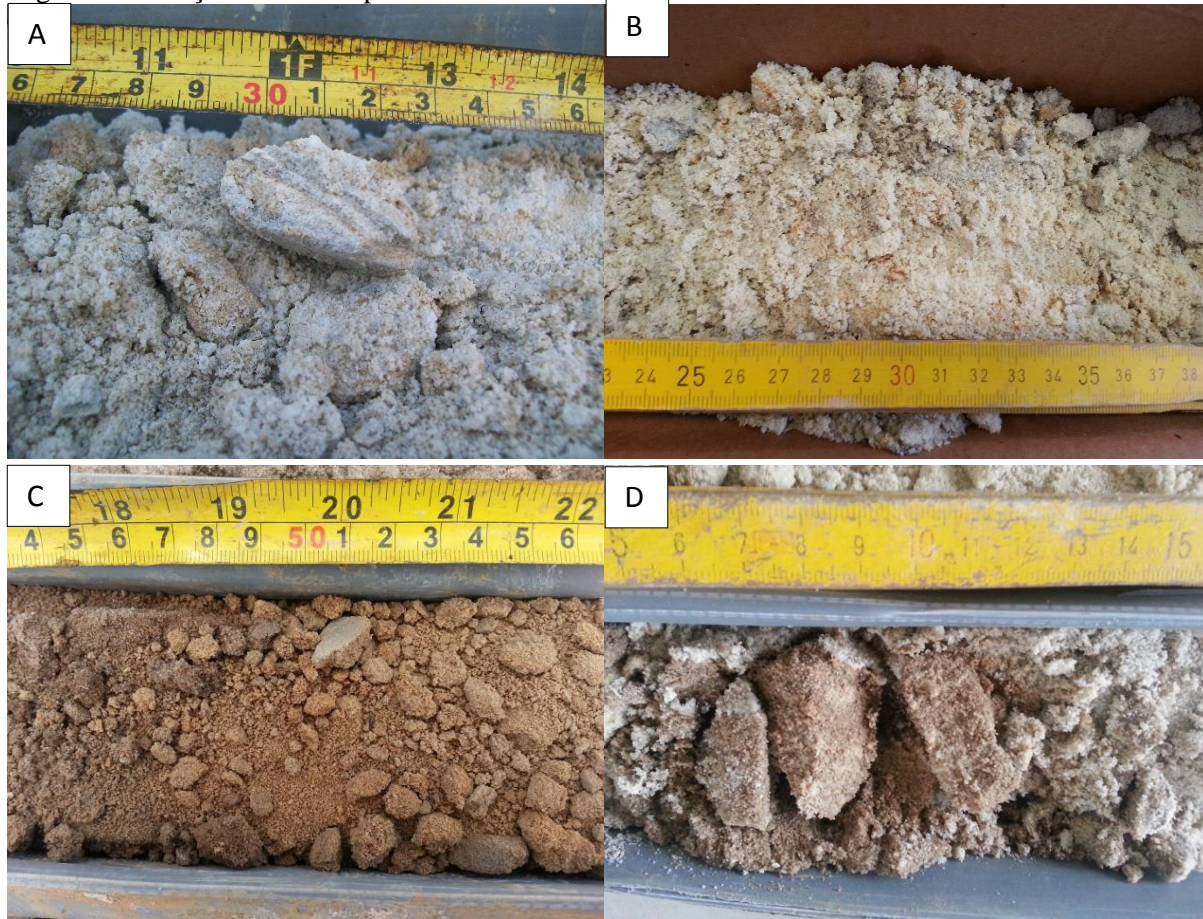
A sedimentação quaternária divide-se em dois tipos de depósitos nesta área: Paleodunas e sedimentação recente, e está presente no topo de todos os furos descritos.

3.4.1 Paleodunas

A paleoduna que ocorre na área é composta por areia fina a muito fina, raramente média, predominantemente quartzítica, de cor branca a amareleda (Figura 14A e B), muito raramente possui estratificação preservada. A espessura máxima alcançada é de 14,50 metros,

com média de 10,60 metros. São sedimentos inconsolidados, medianamente compactos a compactos segundo a classificação da NBR 6484 (ABNT) com base nos ensaios SPT.

Figura 14 – Feições macroscópicas dos sedimentos quaternários



Fonte: objetos da pesquisa.

Notas: A) Estratificação preservada em sedimento pobremente consolidado, variando de níveis branco amarelados intercalados com níveis brancos, granulometria areia fina a muito fina, a 12,70 m de profundidade no furo SR-103+160 (UTM 554.392,58 E; 9587452,61 S); B) Sedimento quartzítico inconsolidado com cerca de 1% de opacos, granulometria areia muito fina, cor clara, aos 13,80 m do furo SM-103+240 (UTM 554.483,87 E; 9.587.399,82 S); C) Areia quartzítica fina a média com silte, laranja amarronzada clara, em 2,60 m de prof. no furo SR-103+020 (UTM 554.316,34 E; 9.587.452,94 S); D) Sedimento granulometria areia fina a média, bege claro a marrom, quartzítico, em 8,75 m no furo SR-103+600 (UTM 554.815,36 E; 9.587.311,93 S).

Seu contato de topo são as areias da sedimentação recente e sua base está geralmente em contato com o siltito arenoso da Fm. Barreiras e na região central da área de estudo este contato é direto com o basanita.

3.4.2 *Sedimentação recente*

Os sedimentos recentes são compostos por areias quartzíticas finas a médias, com silte, de cor bege amarronzada (Figura 14C e D) e espessura máxima de 7 metros. São sedimentos inconsolidados e com base nos ensaios SPT podem ser classificados como fofos a medianamente compactos segundo a NBR 6484. Seu contato basal é a paleoduna, embora muitas vezes esse contato seja impreciso devido ao tipo de sondagem realizada, pois na sondagem mista os intervalos entre um ensaio SPT e outro são descartados.

4 PETROLOGIA E GEOQUÍMICA

No Capítulo 4 são apresentados os procedimentos realizados para os estudos petrológicos e geoquímicos. Na sequência são apresentados os resultados da petrografia e das análises químicas das amostras, bem como comparações geoquímica entre as amostras estudadas e amostras de outros vulcanismos.

4.1 Métodos

Os testemunhos dos furos de sondagem rotativa, com a presença ou não de rocha vulcânica, foram descritos e fotografados e foram feitas e descritas lâminas delgadas da rocha vulcânica. A tabela 4 apresenta a composição modal de cada uma das amostras. Inicialmente uma amostra de cada furo foi analisada pelo ACME *Veritas Bureal*. Após a constatação de que a bibliografia apresentava poucas informações a respeito dos elementos traço para as alcalinas félsicas do Vulcanismo Messejana foram selecionadas duas amostras do *neck* Pão de Açúcar, indicado na figura 5, e enviadas para análise no SGS Geosol. As análises realizadas (Tabela 5) são denominadas pelos pacotes comerciais, LF200 no caso do ACME e ICP95A/IMS95A no caso do SGS Geosol, sendo que no ACME todos os elementos foram analisados por ICP / ICP MS e o SGS Geosol analisou os elementos maiores e Ba, V, Zn, Sr e Zr por ICP OES, enquanto quanto os demais elementos foram analisados por ICP MS.

O cálculo da Norma CIPW foi realizado pelo software KWare Magma (Wohletz, 2016) e os minerais normativos podem ser vistos na tabela 5. As amostras foram plotadas nos diagramas $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (Miyashiro, 1975), CaO vs. Na_2O (Vallance, 1974) e TAS (Le Bas *et al.* 1986) para discriminação de rochas espilitizadas, identificação de processos pós-magmáticos e classificação geoquímica de rochas vulcânicas, respectivamente. Também foram plotadas no diagrama TAS as amostras dos vulcanismos Fernando de Noronha (Lopes, 2002), Messejana (Guimarães *et al.*, 1982; Rao e Sial 1972), Macau (Knesel *et al.* 2010; Ngonge *et al.* 2016b; Silveira, 2006) e Rio Ceará Mirim (Ngonge *et al.* 2016a). O diagrama de variação do tipo Harker também foi utilizado, mas apenas com dados de Fortaleza, do *neck* Pão de Açúcar e de Fernando de Noronha.

Os elementos menores das amostras de Fortaleza e do *neck* Pão de Açúcar foram plotados nos diagramas ETR e *Spider*, normalizados pelo Condrito-C1 (Sun e McDonough, 1989) e a título de comparação os padrões OIB, *Ocean Island Basalt*, (Sun e McDonough, 1989) e Crosta Continental Superior e Inferior (Taylor e McLennan, 1995), também foram

normalizados nestes diagramas. Buscando uma caracterização geotectônica foram utilizados os ternários La-Y-Nb (Cabani e Lecolle, 1989) e Mn-Ti-P (Mullen, 1983), e o diagrama de Pearce (2008) no qual são relacionadas às razões Th/Yb e Nb/Yb.

Neste trabalho foram utilizadas 3 amostras inéditas de Fortaleza, uma para cada furo, 2 amostras do *neck* Pão de Açúcar (NPA) representando a fração félsica do Vulcanismo Messejana. Já entre os dados de vulcanismo da bibliografia da região utilizaram-se 53 amostras do Fernando de Noronha (VFN), destas 35 da Formação Remédios e 18 da Formação Quixaba, 96 do Macau (VMac), 37 do Rio Ceará Mirim (VRCM) e 21 do Messejana (VMess). Tendo sido aproveitados nestas últimas apenas os dados de elementos maiores, tendo em vista a baixa variedade dos elementos traço analisados para este conjunto.

4.2 Resultados

A ocorrência vulcânica subaflorante em Fortaleza está em média a 20 metros de profundidade na área sondada. Os furos de sondagens onde a rocha vulcânica ocorre tem, em média, 40,5 metros de profundidade e nenhum destes furos atravessam o corpo vulcânico, portanto, no mínimo, é um corpo com mais do que 20 metros de espessura em sua porção mais central. Além dos furos de sondagem rotativa e dos dados de sísmica passiva realizados pelo Governo do Estado do Ceará (Figura 2), os dados de sondagem SPT de simples reconhecimento de empreendimentos nas adjacências e o perfil de poço tubular profundo, como está apresentado na figura 1, permitiram inferir uma dimensão de pelo menos 400 por 320 metros para o corpo vulcânico tabular horizontal. Esta forma indica um jazimento do tipo derrame (Figura 2), que posteriormente seria recoberto pelos sedimentos dunares.

O topo deste corpo está em contato com arenitos siltsos da Formação Barreiras, na porção leste, e com as areias das chamadas paleodunas, a partir de sua porção central para o oeste. Além disso, ocorre uma vulcanoclástica, geralmente saprolitizada, com fragmentos subangulosos de composição e tamanho variados, a oeste do corpo de basanita, próximo à falha destacada na figura 2. A vulcanoclástica apresenta fragmentos de quartzo e microclina em meio a outros fragmentos da rocha, a relação de contato entre esses fragmentos é irregular e seus minerais estão oxidados e argilizados. Nos furos analisados não são visíveis sinais de metamorfismo de contato nas unidades sobrejacentes ao corpo vulcânico. Embora o levantamento sísmico realizado pelo Consórcio Cetenco-Acciona não tenha sido tratado (Figura 2) destaca-se o contraste entre os sedimentos e o corpo vulcânico, sendo possível, ainda, a extrapolação das dimensões do corpo para além dos limites dos perfis transversais (SW-NE).

A rocha é afanítica, geralmente maciça, bastante densa e magnética, com raras amígdalas preenchidas por calcita. Quando são, a rocha tem cor preta a cinza escuro (Figura 9A). Suas fraturas, quando presentes, são frequentemente fechadas e preenchidas por calcita e clorita. No topo do corpo, a rocha tem 1,5 metros de espessura, em média, saprolitizados nos quais a cor é cinza esverdeado com porções ocre (Figura 9B) composta principalmente por argila.

4.2.1 Petrografia

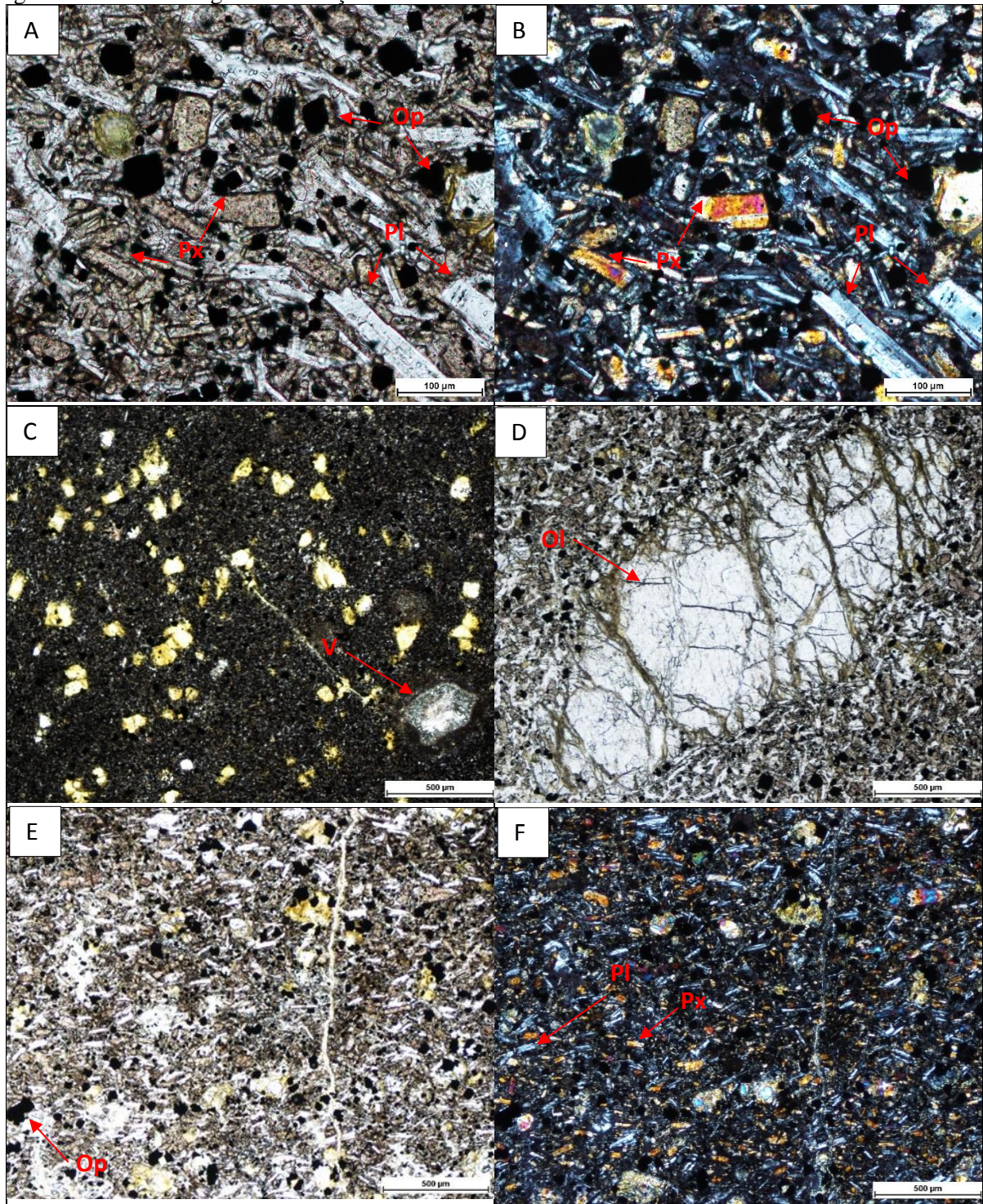
A rocha é caracterizada por uma granulação muito fina, com microfenocristais de olivina, piroxênio e anfibólio (Figura 15A e B) em meio a uma matriz muito fina de plagioclásios, piroxênios e opacos primários (Figura 15C). Esta rocha é homogênea na sua mineralogia e textura, com exceção da borda leste do corpo estudado (furo SR-103+600), onde a granulação da matriz é um pouco mais fina e os microfenocristais são exclusivamente de olivina.

Os microfenocristais de olivina por vezes atingem 2 mm (Figura 15D), sendo o seu tamanho médio bem menor, cerca de 0,15 mm. As olivinas estão, geralmente, fraturadas e ao longo dessas fraturas este mineral está parcialmente alterado para iddingsita. Por vezes ocorrem como microfenocristais clinopiroxênios, alguns com zonação em ampulheta típica da titano-augita, e raramente plagioclásios. Alguns destes microfenocristais de clinopiroxênios estão fracamente cloritizados.

Na matriz destacam-se os plagioclásios ripiformes, muito finos, com suas típicas maclas polissintéticas e frequentemente orientados (Figura 15E e F). Também ocorrem na matriz ortopiroxênios, de prismas curtos, geralmente euédricos a subédricos, não alterado, mas geralmente com inclusões de opacos, seus cristais também apresentam textura de fluxo. As apatitas presentes nesta rocha são muito finas, com tamanho médio de 0,005 mm.

Os minerais opacos são principalmente titano-magnetita, de granulação fina, perfazendo de 15 a 25% da proporção modal da rocha e mostram orientação de fluxo juntamente com os feldspatos e piroxênios da matriz.

Figura 15 – Fotomicrografias de feições características do basanita



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: Ol = olivina; Op = opacos; Pl = plagioclásio, Px = piroxênio, V = vesícula. A e B) Cristais euédricos e subédricos de piroxênio e ripas de plagioclásio (SM-XX); C) Visão geral da amostra da borda do corpo (SR-103+600) com microfenocristais de olivina, clinopiroxênio e opacos em matriz muito fina de plagioclásios, ortopiroxênios e opacos, acima da legenda vesícula preenchida; D) Microfenocristal de olivina bastante fraturado (SM-103+240) com alteração de iddingsita, preferencialmente nas fraturas, cercado por matriz fina composta por opacos (pretos), piroxênios (castanhos translúcidos), feldspatos (translúcidos) e ainda olivinas menores; E e F) Visão geral da lâmina SM-XX, com orientação de fluxo das ripas de plagioclásio e dos prismas de piroxênio da matriz. Em A e B aumento de 20x, em C, D, E e F aumento de 5x. A, C, D e E nicóis descruzados, B e F, cruzados.

As vesículas têm formas e tamanhos variados e estão preenchidas por minerais secundários (Figura 15C). Os pequenos cristais de apatita crescidos radialmente a partir de suas paredes internas são frequentes. No núcleo de algumas vesículas há, comumente, uma massa carbonática e, raramente, zeólita com inclusões. Também é possível encontrar vesículas preenchidas por epidoto.

As microfraturas da rocha estão sempre preenchidas por calcita e serpentina. Estes dois minerais apresentam duas formas distintas de ocorrência. Em uma destas formas a calcita apresenta crescimento perpendicular à fratura, onde a clorita anédrica preenche os interstícios entre a fratura e a calcita. Na outra forma de ocorrência as fraturas são preenchidas preferencialmente por clorita que, geralmente, está acompanhada por porções descontínuas de calcita anédrica localizadas, principalmente, no eixo central da fratura.

Os aspectos petrográficos das amostras da borda leste do corpo vulcânico subaflorante em Fortaleza são microfenocristais de olivina parcialmente alterados para serpentina, havendo cristais completamente substituídos, enquanto outros ainda estão bem preservados. Não há orientação mineral, a matriz forma uma massa intersticial onde os cristais são bastante finos, não sendo possível distinguir o limite entre os minerais, e a presença de vesículas é mais frequente nestas amostras.

As composições modais das amostras descritas estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Modo de ocorrência e porcentagem visual dos minerais da rocha subaflorante

	SM-XX	SM-103+240	SR-103+600
Microfenocristais	5	3	10
Matriz	94	96	80
Vesículas	1	1	10
Total	100	100	100
Microfenocristais (%)			
Feldspato	3	-	1
Olivina	45	54	74
Piroxênio	45	45	24
Magnetita	7	1	1
Total Microfenocristais	100	100	100
Matriz (%)			
Feldspato	39	29	36
Piroxênio	48	48	35
Magnetita	13	20	25
Clorita	-	2	2
Carbonato	-	1	2
Total Matriz	100	100	100

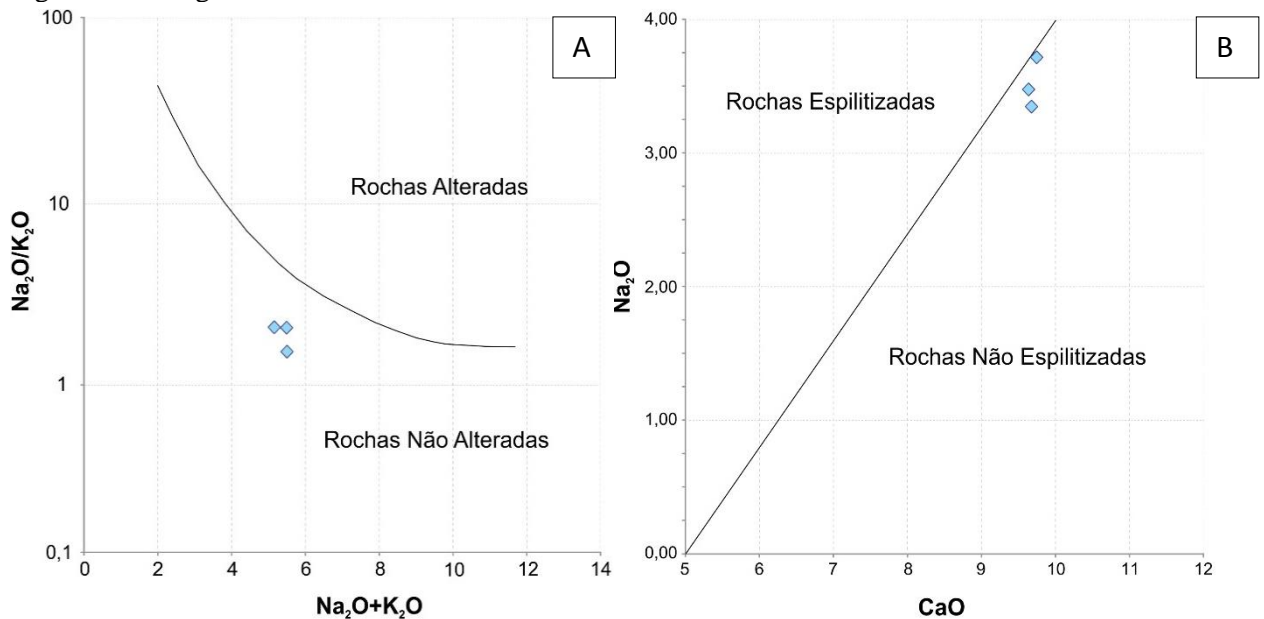
Fonte: dados da pesquisa.

4.2.2 Geoquímica

A rocha vulcânica subaflorante em Fortaleza apresenta conteúdo de SiO_2 de 41,13 a 42,32, K_2O de 1,71 a 2,22, Na_2O variando de 3,32 a 3,70, valores de CaO entre 9,56-9,70 e razões $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ entre 1,50 e 2,03. As rochas do Vulcanismo Messejana (*neck* Pão de Açúcar) compreendem fonolitos e traquitos apresentando conteúdo de SiO_2 entre 61,49-61,75, K_2O de 4,88 a 5,72, Na_2O variando de 8,84-9,51, CaO de 0,56 a 1,16 e razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ entre 1,66 e 1,81.

No diagrama $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (MIYASHIRO, 1975), onde se diferenciam rochas que sofreram ou não processos de alteração intempélica, as amostras de rochas alcalinas máficas de Fortaleza caem no campo das rochas não alteradas. Considerando o diagrama CaO vs. Na_2O (VALLANCE, 1974), que diferencia rochas espilitizadas, que se cristalizaram dentro da água, e rochas não espilitizadas, estas amostras caem no campo das rochas não espilitizadas (Figura 16).

Figura 16 – Diagramas $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ e CaO vs. Na_2O



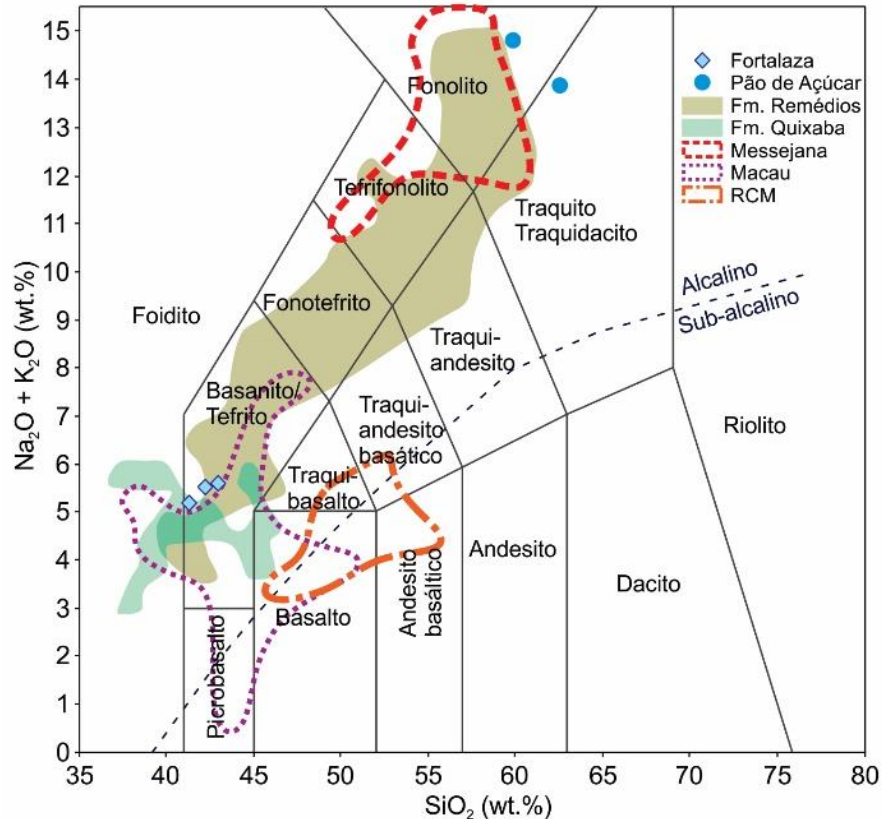
Fonte: elaborada pela autora.

Notas: A) Diagrama $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (MIYASHIRO, 1975) que discrimina rochas que passaram por modificações químicas por processos pós-magmáticos. B) Diagrama CaO vs. Na_2O (VALLANCE, 1974) que discrimina rochas espilitizadas e de rochas não espilitizadas.

O diagrama TAS, Si_2O vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, apresentado na figura 17 tem indicação dos campos que delimitam os vulcanismos Rio Ceará Mirim com rochas essencialmente subalcalinas (tholeíticas), Messejana (VMess), Fernando de Noronha (VFN) e Macau de afinidade

alcalina, sendo o Vulcanismo Macau também de composição sub-alcalina. Neste diagrama as amostras máficas de Fortaleza caem no campo das rochas de afinidade alcalina, especificamente no campo dos basanitos/tefritos. As rochas félsicas do *neck* Pão de Açúcar (VMess) também são alcalinas, sendo uma destas amostras classificada como um fonolito e a outra como um traquito.

Figura 17 – Diagrama TAS com as amostras dos vulcanismo e Fortaleza, Messejana, Fernando de Noronha, Macau e Rio Ceará Mirim



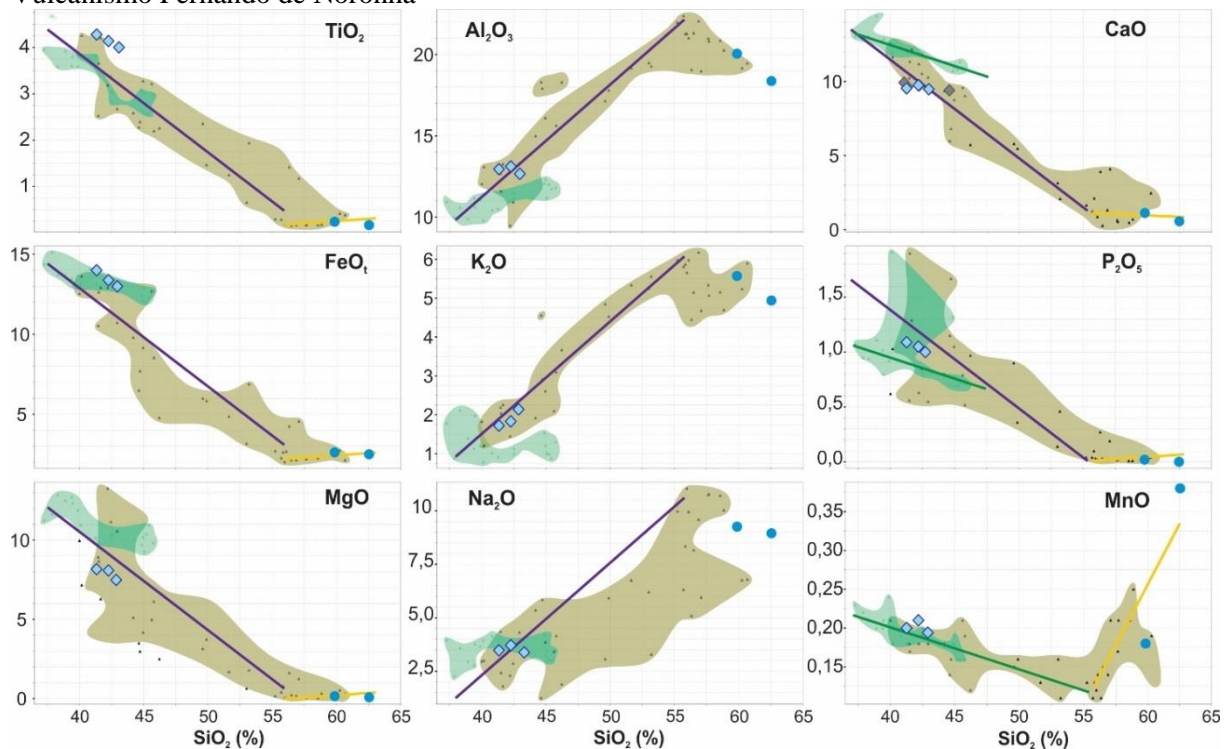
Fonte: modificado de Le Bas *et al.* (1986).

Notas: amostras de Fortaleza estão representadas por losangos, as duas amostras do *neck* Pão de Açúcar estão representadas por círculos, as amostras do VMess (GUIMARÃES *et al.*, 1982; RAO; SIAL, 1972) pela área vermelha, as do VFN (LOPES, 2002), subdivididas nas Formações Remédios e Quixaba, por áreas preenchidas bege e azul claro, respectivamente, as do VMac (KNESEL *et al.* 2010; NGONGE *et al.* 2016b; SILVEIRA, 2006) pela área roxa e as do VRCM (NGONGE *et al.*, 2016a) por pela área laranja.

As composições das amostras de Fortaleza e do *neck* Pão de Açúcar estão listadas na tabela 5. Nesta tabela também estão apresentados os minerais normativos, calculados a partir da Norma CIPW, para cada uma das amostras e indicam uma rocha nefelina normativa, subsaturada em sílica.

O diagrama Harker, apresentado na figura 18, mostra a relação qualitativa entre os elementos maiores em função de SiO_2 para as amostras de Fortaleza, do *neck* Pão de Açúcar (VMess) e do Vulcanismo Fernando de Noronha (VFN), sendo que as amostras deste último grupo estão representadas por dois subgrupos: Fm. Remédios e Fm. Quixaba. É possível identificar um fracionamento positivo para Al_2O_3 , K_2O e Na_2O , menos evidente para o Na_2O que apresenta maior dispersão, até 55% de SiO_2 . Já no caso dos TiO_2 , Fe_2O_3 e MgO esse fracionamento é negativo e também ocorre até 55% de SiO_2 . Para CaO e P_2O_5 percebe-se o mesmo fracionamento negativo, com exceção para as amostras da Fm. Quixaba cujo *trend* de fracionamento é menos acentuado, embora para o P_2O_5 haja uma certa dispersão aos 42,5% de SiO_2 . O MnO também mostra um fracionamento negativo até 57% de SiO_2 , apesar de em uma razão menor.

Figura 18 – Diagrama de variação de Harker para as amostras de Fortaleza, do *neck* Pão de Açúcar e do Vulcanismo Fernando de Noronha



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Losangos representam amostras de Fortaleza, círculos as amostras do *neck* Pão de Açúcar, as nuvens verdes a Fm. Remédios e as nuvens azuis, a Fm. Quixaba, ambas do Vulcanismo Fernando de Noronha (LOPES, 2002).

Tabela 5 – Análises químicas dos elementos maiores, traço e Norma CIPW das amostras

Amostras	SM-XX	SM-103+600	SM-103+240m	PA_F01	PA_T01
<i>wt%</i>					
SiO ₂	42.05	41.13	42.32	61.49	61.75
Al ₂ O ₃	13.06	12.89	12.75	20.60	18.14
Fe ₂ O _{3t}	13.32	13.93	12.92	2.69	2.47
MgO	8.05	8.13	7.36	0.15	0.08
CaO	9.70	9.59	9.56	1.16	0.56
Na ₂ O	3.70	3.46	3.32	9.51	8.84
K ₂ O	1.82	1.71	2.22	5.72	4.88
TiO ₂	4.12	4.26	4.04	0.25	0.17
P ₂ O ₅	1.04	1.08	1.00	0.02	<0,01
MnO	0.21	0.20	0.20	0.19	0.38
Cr ₂ O ₃	0.025	0.013	0.02	<0,01	<0,01
LOI	2.30	3.00	3.08	0.94	1.44
Sum	99.52	99.51	98.82	102.73	98.73
<i>ppm</i>					
Ba	650.00	753.00	641.00	162.00	<10
Rb	46.50	36.30	52.00	200.60	252.20
Sr	1222.20	1208.50	1122.35	105.00	<10
Y	38.50	38.30	34.08	23.05	38.04
Zr	469.00	511.80	486.85	964.00	1495.00
Nb	105.40	112.10	105.86	175.40	278.19
Th	11.00	11.30	9.55	22.30	35.90
Ga	21.00	20.80	20.80	29.60	32.20
Zn	-	-	67.00	124.00	201.00
Cu	-	-	22.00	<5	<5
Ni	86.00	95.00	84.50	11.00	8.00
V	285.00	278.00	243.50	14.00	<5
Hf	10.30	11.40	10.25	15.79	26.74
Cs	0.60	1.10	0.69	2.35	4.45
Sc	22.00	20.00	11.00	-	-
Ta	6.70	7.10	5.94	6.55	9.23
Co	45.20	49.10	42.70	1.20	0.50
U	3.10	3.30	2.72	6.81	10.24
W	1.50	1.20	2.25	4.10	5.10
Sn	3.00	3.00	2.05	1.30	2.80
Mo	-	-	3.00	12.00	15.00
La	91.40	94.50	92.40	98.40	179.50
Ce	185.50	193.80	188.40	159.20	283.60
Pr	21.76	22.79	20.49	11.84	19.35
Nd	87.40	88.40	79.20	31.90	47.80
Sm	14.37	14.62	13.33	4.00	5.30
Eu	4.24	4.46	3.90	0.72	0.63
Tb	1.50	1.58	1.48	0.56	0.79
Gd	11.50	12.46	10.98	3.25	4.49
Dy	7.80	8.21	7.53	3.20	5.40
Ho	1.45	1.51	1.32	0.73	1.21
Er	3.40	3.65	3.26	2.58	4.39
Tm	0.48	0.49	0.45	0.41	0.71
Yb	2.86	2.93	2.60	3.10	5.20
Lu	0.40	0.42	0.37	0.48	0.82
Lab	ACME	ACME	MÉDIA	SGS	SGS
Mg# *	54.5	53.4	53.10	9.9	6
<i>Diagrama TAS**</i>					
Classificação	Basanito	Basanito	Basanito	Fonolito	Traquito
<i>Norma CIPW***</i>					
Or	11.08	10.49	13.67	33.2	29.62

Ab	8.42	8.26	9.27	40.03	55.41
An	14.05	15.12	13.97	0.00	0.00
Ne	12.92	12	10.86	17.75	6.82
Di	23.43	22.15	23.67	4.87	2.54
Ac	0.00	0.00	0.00	0.76	0.73
Ol	17.66	19.02	16.29	1.64	2.69
Mt	2.00	2.10	1.97	0.00	0.00
Il	8.08	8.41	8.03	0.46	0.33
Ap	2.35	2.46	2.29	0.04	0.00

Fonte: dados da pesquisa.

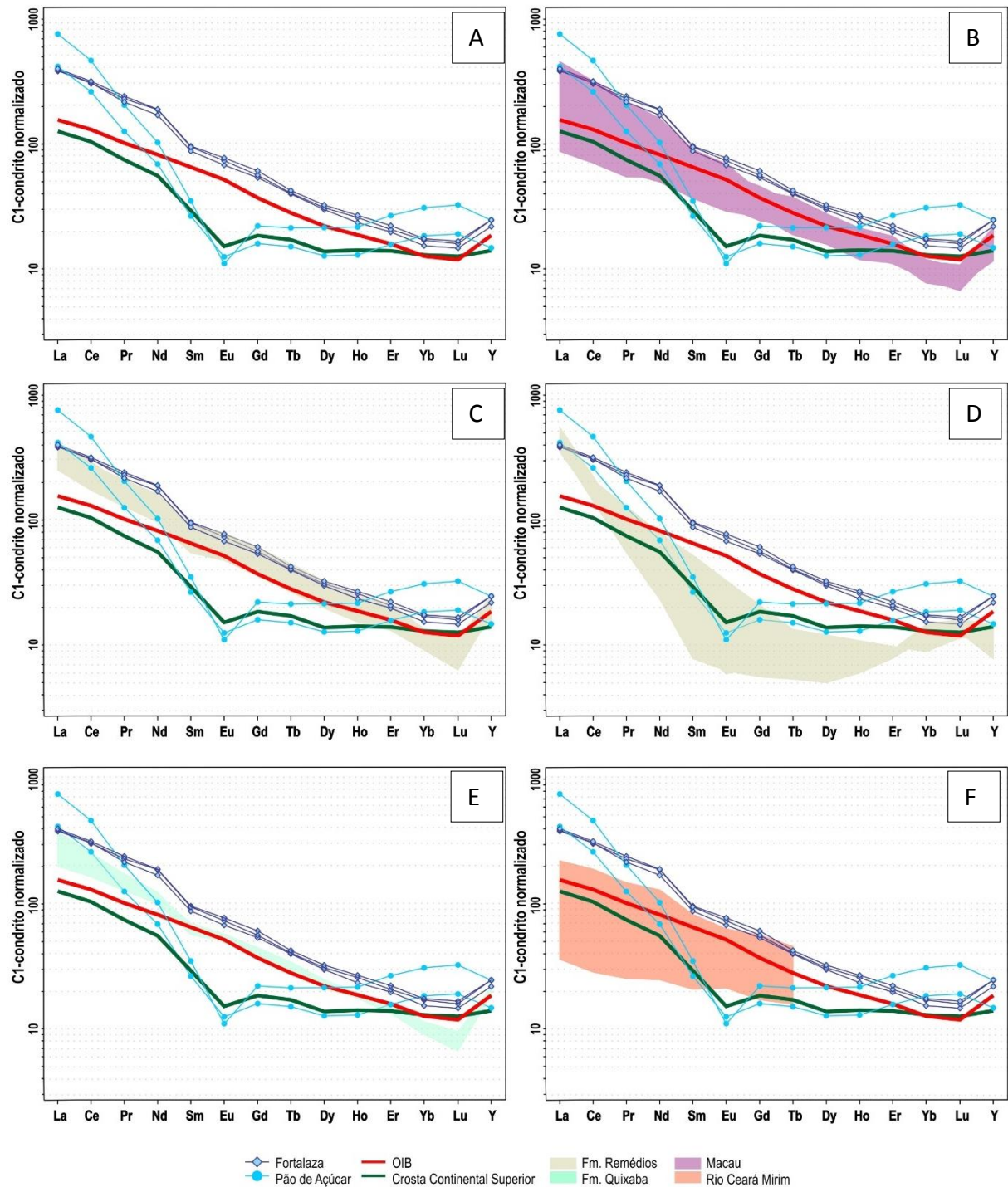
Notas: *Mg# = $100 \cdot \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$, onde os óxidos são expressos em proporções molares. ** Diagrama TAS (LE BAS *et al.*, 1986). *** Calculado pelo *software* KWare Magma.

4.2.2.1 Elementos traço

Os Elementos Terras Raras (ETR) normalizados pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH, 1989) mostram que os ETR leves estão relativamente enriquecidos tanto para as amostras de Fortaleza quanto para as amostras do *neck* Pão de Açúcar (Figura 19), embora essas últimas apresentem uma tendência de distribuição horizontal, com relativo enriquecimento dos ETR pesados, a partir do Gd. Nas amostras de Fortaleza Nd e Y apresentam um pequeno enriquecimento relativo. Já as amostras do *neck* Pão de Açúcar mostram uma anomalia negativa de Eu a partir da qual ocorre o enriquecimento relativo dos ETR pesados, enquanto há uma depleção em Y. Quando comparadas com as amostras padrões OIB (SUN; MCDONOUGH, 1989) e Crosta Continental Superior (TAYLOR; MCLENNAN, 1995) nota-se que as amostras de Fortaleza se assemelham mais ao padrão OIB (*Ocean Island Basalt*) e que as amostras do *neck* Pão de Açúcar seguem o padrão Crosta Continental Superior, embora em ambos os casos as amostras estejam enriquecidas em relação aos padrões comparados.

Os padrões dos ETRs das amostras máficas de Fortaleza apresentam razão Ce/Yb_N de 18,02 a 20,17, mostram um grau de enriquecimento muito semelhante às alcalinas máficas do vulcanismo Fernando de Noronha (VFN), como exibido na figura 19C e 19E, e ainda apresentam uma assinatura similar a dos vulcanismos Macau (VMac) e Rio Ceará Mirim (VRCM) (Figura 19B e 19F). O comportamento dos padrões ETRs das amostras do *neck* Pão de Açúcar (VMess) também é bastante semelhante às alcalinas félsicas do VFN, embora menos enriquecido (Figura 19D).

Figura 19 – Diagramas de ETR das alcalinas básicas de Fortaleza e das alcalinas félsicas do *neck* Pão de Açúcar normalizados pelo Condrito-C1

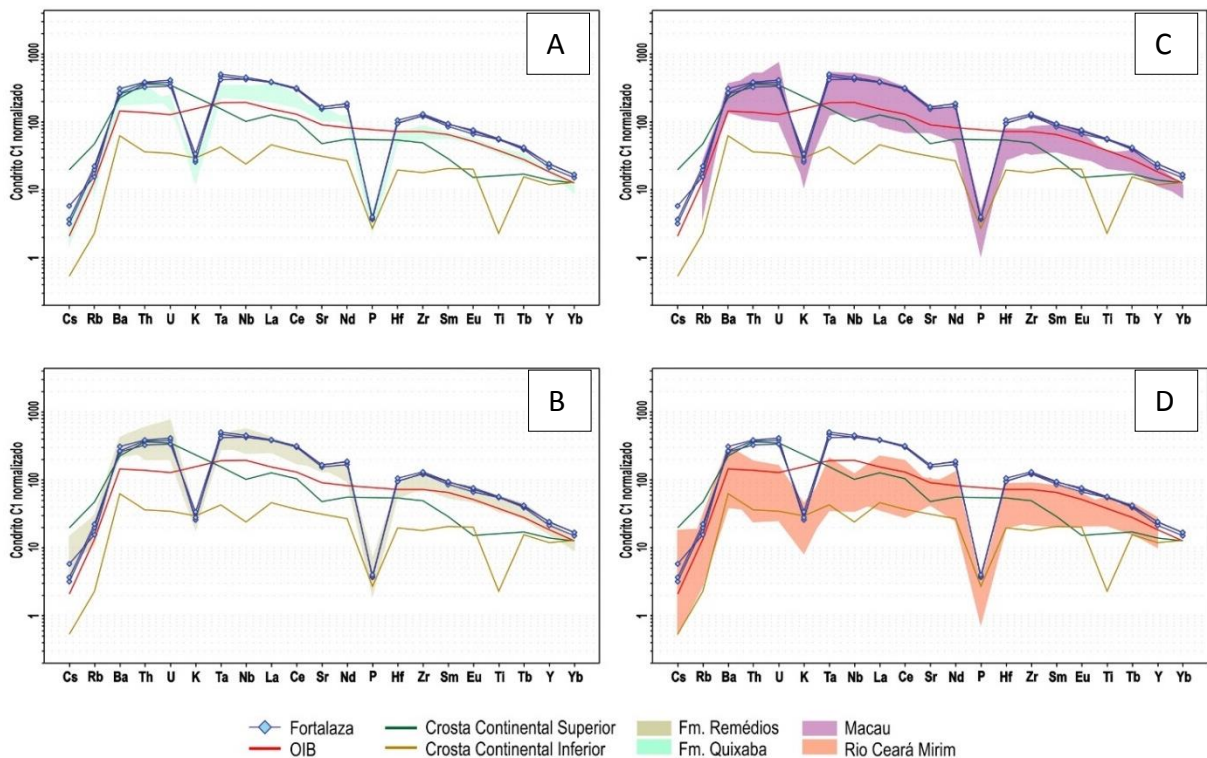


Fonte: dados da pesquisa normalizados pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH,1989).

Notas: A) Diagrama de ETR das alcalinas básicas de Fortaleza e das alcalinas félsicas do *neck* Pão de Açúcar, padrões OIB (SUN; MCDONOUGH,1989) e Crosta Continental Superior (TAYLOR; MCLENNAN, 1995); Nos quadros B, C, D, E e F estão representadas, respectivamente, as amostras dos vulcanismos Macau (NGONGE *et al.* 2016b), máficas e félsicas da Fm. Remédios, Fm. Quixaba (LOPES, 2002) e Rio Ceará Mirim (NGONGE *et al.*, 2016a).

No diagrama *Spider* (Figura 20) normalizado pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH, 1989) as amostras de Fortaleza e as rochas máficas dos VFN e VMac, no geral, tem comportamento bastante semelhante ao padrão OIB e um leve enriquecimento em Nb, embora também estejam enriquecidas em incompatíveis, como Ba, Th e U e depletadas em Sr, como o padrão da Crosta Continental Superior. Essas amostras diferem do VRCM principalmente em relação ao Th, U e Nb. Quando comparadas ao padrão da Crosta Continental Inferior (TAYLOR; MCLENNAN, 1995) as rochas máficas apresentam a mesma depleção em P.

Figura 20 – Diagramas do tipo *Spider* normalizados pelo Condrito-C1 para as alcalinas máficas de Fortaleza em comparação aos padrões OIB, Crosta Continental Inferior e Crosta Continental Superior



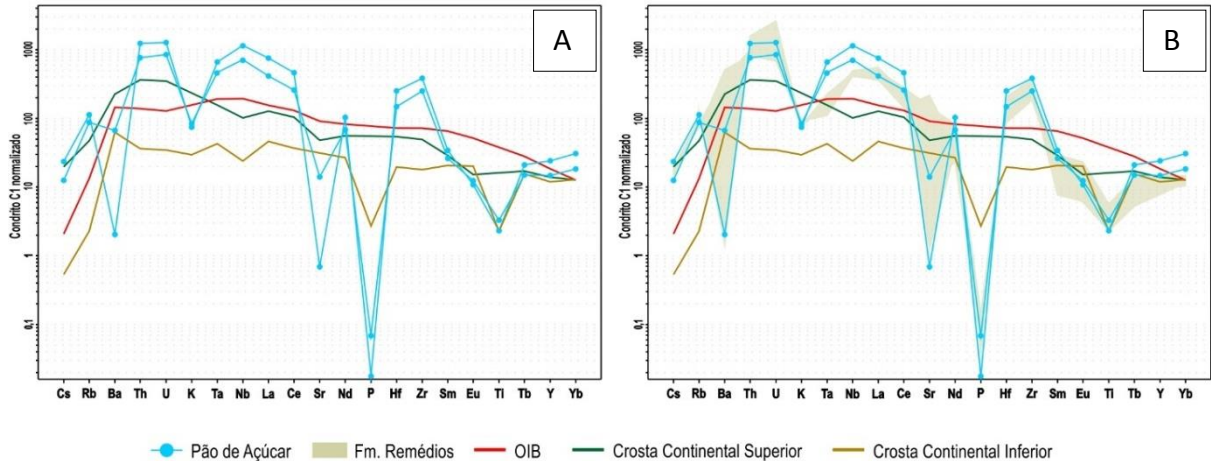
Fonte: dados da pesquisa normalizados pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH, 1989).

Notas: Normalização pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH, 1989), onde são comparadas as alcalinas máficas de Fortaleza com os padrões OIB (SUN; MCDONOUGH, 1989), Crosta Continental Inferior e Crosta Continental Superior (TAYLOR; MCLENNAN, 1995). Em cada um dos quadros estão representadas as rochas máficas de Fernando de Noronha (LOPES, 2002), Fm. Remédios e Fm. Quixaba, A e B, respectivamente. Em C as rochas do Vulcanismo Macau (NGONGE *et al.* 2016b) e em D as rochas do Vulcanismo Rio Ceará Mirim (NGONGE *et al.*, 2016a).

As rochas félsicas dos vulcanismos Messejana (*neck* Pão de Açúcar) e Fernando de Noronha, por outro lado, aproximam-se mais ao padrão da Crosta Continental Superior, embora para os elementos Ta, Nb, La, Ce e Nd seu comportamento assemelhe-se ao OIB (Figura 21). No geral há enriquecimento dos incompatíveis e um pequeno enriquecimento em Ta e Nd nas

amostras félsicas do vulcanismo continental estudado em relação às rochas do arquipélago Fernando de Noronha, estas amostras apresentam a mesma depleção em P e Ti quando comparadas ao padrão Costa Continental Inferior.

Figura 21 –Diagrama *Spider* normalizados pelo Condrito-C1 para as rochas do *neck* Pão de Açúcar



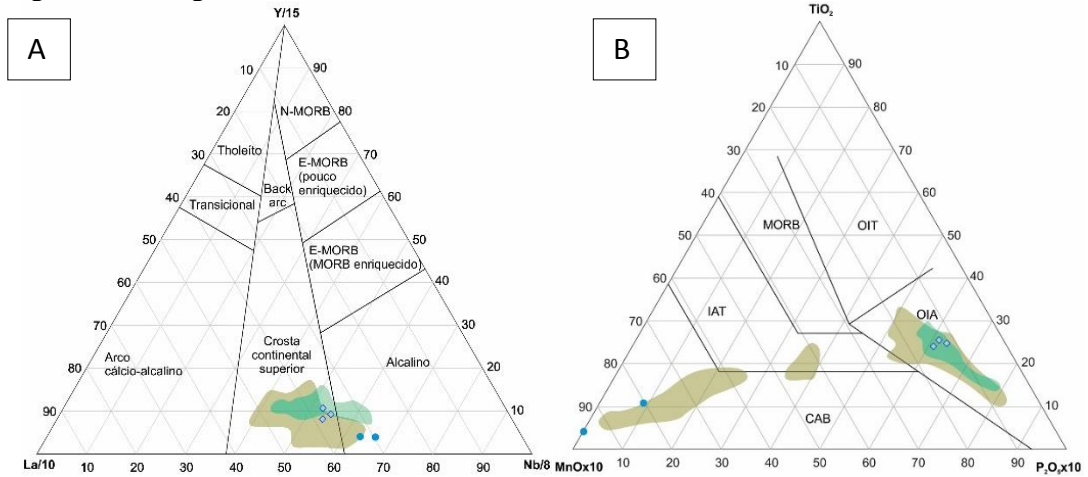
Fonte: dados da pesquisa normalizados pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH, 1989).

Notas: A) Diagrama *Spider* normalizados pelo Condrito-C1 (SUN; MCDONOUGH, 1989) para as rochas do neck Pão de Açúcar (NPA). Em destaque os padrões OIB (SUN; MCDONOUGH, 1989), Crusta Continental Inferior e Crusta Continental Superior (TAYLOR; MCLENNAN, 1995). B) Comparação entre as rochas do NPA e as rochas félsicas da Fm. Remédios, Vulcanismo Fernando de Noronha (LOPES, 2002).

4.2.2.2 Abordagem Geotectônica

No diagrama discriminante geotectônico ternário La-Y-Nb (CABANIS; LECOLLE, 1989) as amostras de Fortaleza e do *neck* Pão de Açúcar (NPA) caem entre os campos das rochas alcalinas e do vulcanismo intracontinental, bem como as amostras do VFN. As amostras analisadas (Fortaleza e NPA) e as do VFN distribuem-se entre os campos OIA (*Ocean Island Alkalic*), IAT (*Island Arc Tholeiite*) e CAB (*Calcalkalic basalt*) do diagrama ternário Mn-Ti-P (MULLEN, 1983), sendo as amostras félsicas do NPA apresentando, preferencialmente, maior razão de MnO, como exibidas na figura 22. No diagrama de variação Th/Yb vs. Nb/Yb de Pearce (2008) (Figura 23), todas as amostras de Fortaleza e do NPA caem no campo OIB (*Ocean Island. Basalt*), da mesma forma que as amostras do vulcanismo Fernando de Noronha.

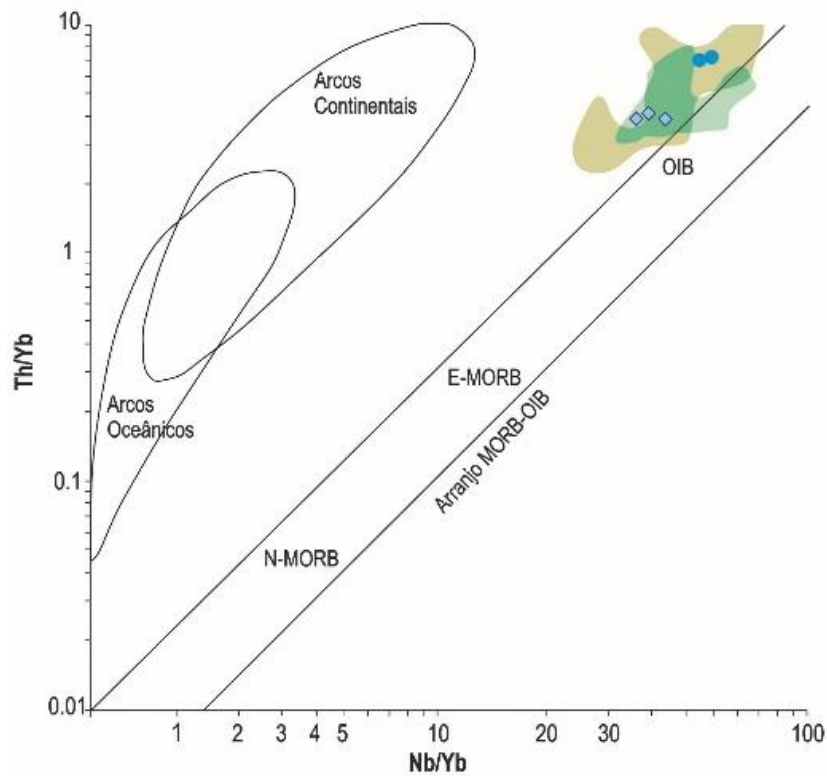
Figura 22 – Diagramas ternários La-Y-Nb e Mn-Ti-P



Fonte: modificado de A) Cabanis e Lecolle (1989) e B) Mullen (1983).

Notas: amostras de Fortaleza estão representadas por losangos, as duas amostras do *neck* Pão de Açúcar estão representadas por círculos e as amostras do VFN (LOPES, 2002), subdivididas nas Formações Remédios e Quixaba, por nuvens bege e azul claro, respectivamente.

Figura 23 – Diagrama Th/Yb vs. Nb/Y para as amostras de Fortaleza, do *neck* Pão de Açúcar e do VFN



Fonte: modificado de Pearce (2008).

Notas: amostras de Fortaleza (losangos), *neck* Pão de Açúcar (círculos) e VFN (nuvens).

4.3 Discussões – Petrologia e Geoquímica

A rocha vulcânica máfica subaflorante em Fortaleza corresponde a um corpo com dimensões em torno de 400 por 320 metros em área e no mínimo 20 metros de espessura. Imagens do levantamento de Sísmica Passiva Roadside *MASW* sobre a área de ocorrência do corpo vulcânico mostram descontinuidades de direção NE-SW correspondentes às margens deste corpo, que apresentam textura bem mais fina em relação às porções centrais desta ocorrência. Estas observações apoiam a interpretação de possíveis falhas para as descontinuidades observadas nas imagens sísmicas.

Na região costeira entre Fortaleza e Acaraú, município a oeste da capital, foi reconhecido um sistema de falhas e fraturas de orientação E-W (COSTA *et al.*, 2002), o que confirmaria o prolongamento da Zona de Fratura Fernando de Noronha e permitiria o desenvolvimento do magmatismo alcalino e da sismicidade no continente, condições básicas para a defesa da continuidade de uma zona de fratura oceânica até a litosfera continental (SYKES, 1978). Dadas as dimensões deste corpo e características tais como sua textura afanítica, a presença de olivinas, vesículas e amígdalas, e a não existência de metamorfismo de contato com a unidade superior é possível assumir que esta manifestação vulcânica se deu sob a forma de derrame. Assim, este vulcanismo favoreceu-se do sistema de falhas proposto por Costa *et al.* (2002), permitindo a descompressão do líquido magmático cristalizado a altas temperaturas com liberação de voláteis.

Petrograficamente as rochas vulcânicas subaflorantes em Fortaleza são bastante similares às vulcânicas máficas de Fernando de Noronha (ALMEIDA *et al.*, 1988; ALMEIDA, 2006; FODOR *et al.*, 1998). O Vulcanismo Fernando de Noronha tem uma ampla variedade de indivíduos da série alcalina (LOPES; ULBRICH, 2015), sendo a Formação Remédios composta por indivíduos menos diferenciados aos mais diferenciados, e a Formação Quixaba composta por indivíduos menos diferenciados. A suíte alcalina do continente (Vulcanismo Messejana) restringe-se a traquitos, fonólitos, tefritos, fonotefritos (GUIMARÃES *et al.*, 1982; MACCIOTTA *et al.*, 1990). As amostras reanalisadas do *neck* Pão de Açúcar, que fazem parte do Vulcanismo Messejana, são as representantes mais diferenciadas da série alcalina. Com base nas avaliações petrológicas e dados geoquímicos deste estudo, que caracterizou como basanita a rocha subaflorante de Fortaleza, esta ocorrência máfica foi adicionada ao Vulcanismo Messejana, que desta forma passa a ter um caráter bimodal, assim como ocorre no arquipélago Fernando de Noronha.

O diagrama de Miyashiro (1975), que indica que as amostras deste basanita não sofreram modificações químicas por processos pós-magmáticos, deve ser analisado com cautela devido ao fato de utilizar apenas Na_2O e K_2O , que como mostrado no diagrama Harker, que demonstram um fracionamento tardio. Enquanto o diagrama de Vallance (1974) indica que as amostras não foram cristalizadas em contato direto com a água do mar, como pode ser observado na figura 16, apoiando a ideia de um vulcanismo máfico continental.

Os dados geoquímicos apresentados no diagrama do tipo Harker mostram um *trend* contínuo para o Vulcanismo Messejana, indicando um controle evolutivo pela cristalização fracionada dos minerais máficos até cerca de 55% de SiO_2 , a partir daí o fracionamento passa a ser de feldspatos alcalinos, plagioclásios e feldspatóides. Embora Rollinson (1993) destaque que as relações entre os elementos maiores visíveis no diagrama de variação Harker podem produzir *trends* artificiais devido a processos numéricos, o fracionamento positivo de Al_2O_3 e K_2O indica o aparecimento de feldspatos potássicos nas rochas félsicas, enquanto o fracionamento negativo de MgO , Fe_2O_3 , TiO_2 e CaO sugerem o desaparecimento da olivina e da titano-magnetita e diminuição dos piroxênios nos componentes máficos. A tendência positiva, apesar de dispersa, para NaO indica o incremento de plagioclásio sódico ou feldspatóides para as rochas félsicas. As olivinas e os clinopiroxênios, como a augita, contêm Mn (MULLEN, 1983) o que corrobora seu relativo fracionamento negativo.

Os padrões ETRs e os diagramas *Spider* mostram a similaridade da rocha máfica alcalina com os padrões OIB (SUN; MCDONOUGH, 1989) e Crosta Continental Superior (TAYLOR; MCLENNAN, 1995). Os diagramas ternários de classificação geotectônica, além de confirmarem associações mais alcalinas devido às razões La/Y e Y/Nb , Nb (CABANIS; LECOLLE, 1989) também indicam uma sobreposição de ambientes. Cabe ressaltar que as amostras projetadas próximo ao vértice MnO são classificadas por Mullen (1983) como boninitas, entretanto um ambiente do tipo *fore-arc* é descartado pelo presente trabalho.

As similaridades exibidas pelos elementos traço das rochas estudadas com o padrão OIB apontam para uma fonte mantélica, embora sua semelhança com o padrão da Crosta Continental Superior se destaque em relação a alguns elementos (Ba, Th, U e Sr). O Vulcanismo Messejana, bem como os outros vulcanismos mais novos do que 140 Ma da porção Setentrional da Província Borborema, incluindo-se aí o VFN, apresentam características de basaltos de ilhas oceânicas (OIB) e ainda assinatura de crosta continental. É difícil correlacionar a abundância dos elementos traço da litosfera continental devido sua composição heterogênea obtida durante enriquecimento e empobrecimento de elementos incompatíveis ao longo do tempo (FODOR *et al.*, 1998). Para alguns autores a geração de magma pode dar-se a partir da mistura de um manto

litosférico com um manto astenosférico (NGONGE *et al.*, 2016a; RIVALENTI, *et al.*, 2007), entretanto não há consenso sobre o tema. Outra hipótese é a de que o enriquecimento em elementos incompatíveis nas rochas destes eventos vulcânicos indicaria contaminação crustal (FODOR *et al.*, 1998), porém o tempo de ascensão e residência na crosta para tal enriquecimento não são compatíveis. Sendo assim, a fonte sugerida para os magmas deste vulcanismo seria uma fonte mais enriquecida em incompatíveis do que a própria fonte do OIB, ou seja, um manto fortemente enriquecido. A partir deste trabalho e considerando-se todas as características similares entre essas suítes alcalina a relação apresentada por Fodor *et al.* (1998) entre as amostras dos vulcanismos Fernando de Noronha (VFN) e Macau pode ser estendida para o Vulcanismo Messejana.

A ideia de eventos magmáticos associados à convecção de borda sugeridos para o vulcanismo no arquipélago Fernando de Noronha (KING, 2007; KING; RISTEMA, 2000; KNESEL *et al.* 2010) pode ser sugerida para os eventos vulcânicos no continente, associados à Zona de Falha Fernando de Noronha. Análises de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mostram que houve vulcanismo no continente, relacionado ao Vulcanismo Macau, contemporaneamente ao VFN (KNESEL *et al.*, 2010). Por isso não deve ser descartada a hipótese de haver rochas vulcânicas mais novas do que $27,8 \pm 0,8$ Ma (CORDANI, 1970) na suíte alcalina de Messajana (VMess). Portanto, ainda cabe uma investigação geocronológica desta porção máfica do VMess a fim de se investigar a ocorrência de magmatismo Miocênico também nesta região.

5 ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIAS

Neste capítulo, após uma breve explicação sobre o uso das análises multivariadas principalmente em dados geoquímicos, são apresentados os resultados de três Análises de Correspondências, também chamadas de Análise Fatorial de Correspondência (AFC), realizadas para as amostras do vulcanismo subaflorante em Fortaleza e outros vulcanismos na região.

Assim como outras técnicas de análise multivariada a Análise Fatorial de Correspondência objetiva correlacionar amostras de diferentes lugares testando sua cogeneticidade. Esta correlação pretende delimitar os eixos de inércia da nuvem dos indivíduos, permitindo ainda, a representação simultânea das amostras e das propriedades em um espaço conjunto a partir de uma transformação simétrica das linhas (indivíduos) e colunas (variáveis) (VALENCHON, 1982, PEREIRA; SOUSA, 1988; HAIR *et al.*, 2009).

Dados geoquímicos são multivariados por natureza (MELLINGER, 1984). As relações entre esses elementos químicos são interdependentes, podendo haver ou não covariância, cogeneticidades, dentre outras. Os dados litogeoquímicos são plotados em diagramas de classificação litológica, tectônica e isotópica (IRVINE; BARAGAR, 1971; LE MAITRE, 1976; COX *et al.*, 1979; GILL, 2010) a fim de estabelecer através de diagramas binários, ternários ou *spider plots* relações genéticas entre as amostras.

Em uma AFC a proximidade da projeção dos resultados em planta indica o nível de associação entre as linhas e colunas, onde a única exigência é que os dados a serem trabalhados componham uma matriz retangular de entradas não-negativas (HAIR *et al.* 2009). É uma técnica utilizada em vários ramos de investigação, inclusive nas ciências da terra, embora seja mais utilizada na avaliação da contaminação ambiental (SALGUEIRO *et al.*, 2008, FERREIRA DA SILVA *et al.*, 2013). Seu emprego no contexto litogeoquímico teve início na década de 80 (VALENCHON, 1982; MELLINGER, 1984), entretanto seu uso não é comum.

O modelo ativo em uma AFC, assim como em outros métodos de análise fatorial, encontrará o sistema de eixos que melhor ajusta a nuvem de pontos das variáveis ativas, permitindo assim diminuir a dimensão do espaço com perda mínima de informação (HOWARTH; SINDING-LARSEN, 1983). Este processo se dá a partir da matriz disjuntiva completa dos dados. A chamada projeção suplementar funciona como uma ferramenta gráfica que permite projetar as variáveis sobre os eixos de inércia sem que seus valores contribuam para a construção dos mesmos (MELLINGER, 1984).

As contribuições absolutas explicam o modelo ativo e cada eixo é explicado pelas propriedades (ou indivíduos) cuja contribuição absoluta é mais importante. Sua relevância para um dado eixo deve ser superior a $100/p$, onde p = número de modalidades (SALGUEIRO *et al.*, 2013). Quando alguma variável é colocada como suplementar, sua contribuição passa a ser relativa. Pode haver uma avaliação de como a modalidade em suplementar se comporta frente ao modelo a partir do valor de sua contribuição relativa, mas essa é uma ferramenta puramente comportamental.

Este método possibilita correlacionar n variáveis (elementos químicos) de amostras com diferentes origens e durante este processo manter o controle desta origem. O objetivo principal neste capítulo é identificar as similaridades entre as amostras da ocorrência vulcânica subaflorante em Fortaleza e amostras de diferentes vulcanismos da Província Borborema Setentrional. A partir da análise multivariada por Análise Fatorial de Correspondências (AFC) foi realizado um mapeamento perceptual entre as relações geoquímicas destas amostras visando diminuir o número de variáveis para um menor número de dimensões nas quais essas variáveis foram correlacionadas.

5.1 Métodos

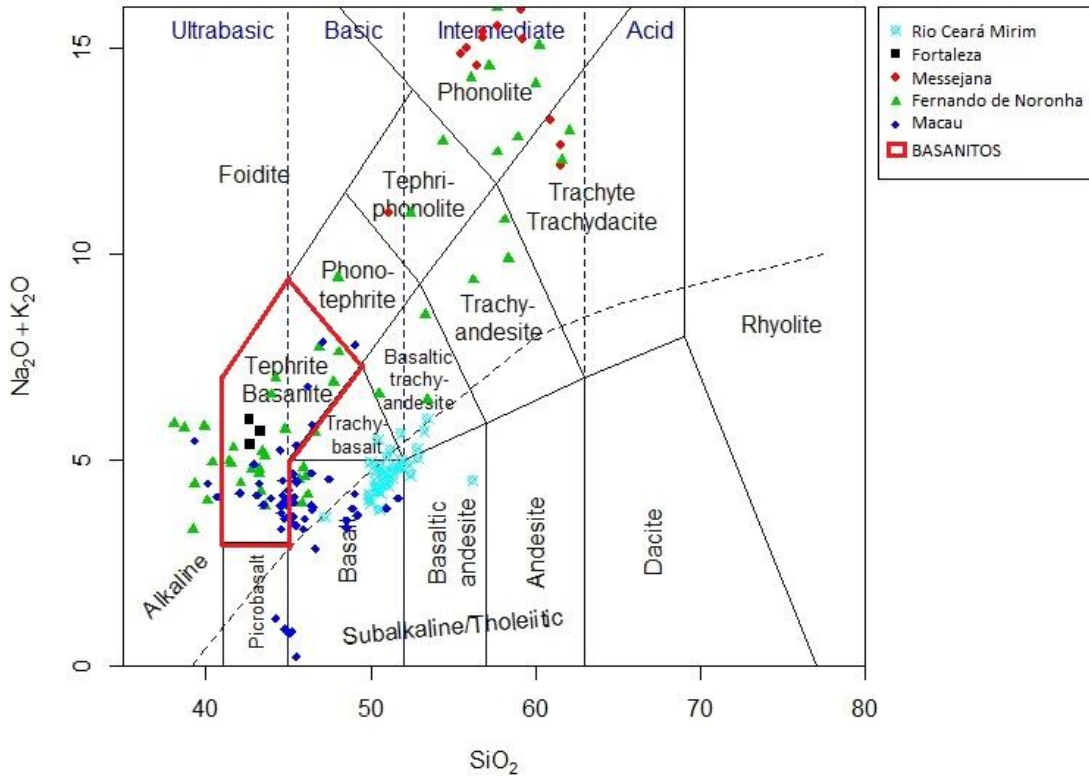
A primeira etapa nesta fase do trabalho envolveu compilação de análises geoquímicas de rochas vulcânicas da região setentrional da PB (Figura 6). Como visto no Capítulo 4 o corpo vulcânico máfico subaflorante em Fortaleza difere petrográfica e geoquimicamente das rochas félsicas do Vulcanismo Messejana. Seus dados geoquímicos foram comparados com dados existentes na literatura (GUIMARÃES *et al.*, 1982; RAO; SIAL 1972; LOPES, 2002; SILVEIRA, 2006; NGONGE *et al.*, 2016).

Um conjunto de 182 amostras foi classificado a partir do Diagrama TAS (LE BAS *et al.*, 1986), todas analisadas para litoquímica de rocha total, incluindo-se as 3 amostras do basanita subaflorante de Fortaleza (Figura 24). Do total das amostras, 41 foram classificadas como basanita e seguiram para a AFC, sendo que 17 são amostras do Vulcanismo Fernando de Noronha, 21 são amostras do Vulcanismo Macau e 3 são amostras do corpo subaflorante de Fortaleza. A origem de cada indivíduo entra na análise como uma variável qualitativa e é colocada como variável suplementar na AFC.

Das 41 amostras foram utilizados apenas os elementos químicos comuns a todas, isso se fez necessário porque algumas análises químicas não cobriram toda a tabela periódica,

totalizando 35 variáveis, sendo 34 quantitativas e 01 qualitativa subdividida em três modalidades intrínsecas de localização.

Figura 24 – Diagrama de classificação TAS com a representação de 182 amostras de vulcânicas Cenozoicas da região setentrional da PB



Fonte: elaborada pela autora, modificado de Le Bas *et al.* (1986).

Neste trabalho foram realizadas três AFC, sendo que na primeira análise somente a variável referente à localização foi colocada como suplementar. Para Mellinger (1984) os padrões de variação dos dados devem ser investigados separadamente para elementos maiores e para traços, sendo este princípio testado nas outras duas AFC. Na segunda AFC as variáveis relativas aos elementos traço foram colocadas em suplementar, ou seja, os elementos maiores foram as variáveis ativas e os fatores relativos a estes dados exibem as variações mineralógicas entre as amostras. Enquanto na terceira AFC as variáveis que entraram como suplementar foram as relativas aos elementos maiores. Assim, os elementos traço foram as variáveis ativas que criaram um modelo que pôde fornecer informações a respeito da variação do elemento traço como elemento de substituição em um mineral, a partir de sua relação com as variáveis suplementares, ilustrando sua relação na assinatura geoquímica de processos geológicos.

As AFCs foram realizadas no Programa Andad (versão 7.12) e o próprio *software* gera a matriz disjuntiva completa, seguindo as predefinições das modalidades definidas. Em

todas as análises as variáveis foram divididas em duas modalidades de igual frequência (valores maiores e valores menores), garantindo o equilíbrio entre as modalidades.

5.2 Resultados

Conforme mostrado na figura 24 a vulcânica de Fortaleza cai no campo dos basanitos, portanto este foi critério para a escolha das outras amostras que também fariam parte de AFC. Os outros vulcanismos coincidentes neste campo são Macau e Fernando de Noronha. Na sequência são apresentados os resultados para cada uma das AFC realizadas.

5.2.1 AFC 1 – todos os elementos ativos, localização como suplementar

Nesta análise foram retidos 4 eixos que representam um total de 98,36% de explicação para interpretação da primeira AFC, o eixo 1 contém 90,77% de explicação, enquanto os eixos 2, 3 e 4 tem, respectivamente, 5,76%, 1,27% e 0,56%. A tabela 6 apresenta quais variáveis ativas são explicadas em cada um desses eixos. Apenas a variável localidade entrou como suplementar. Duas variáveis ativas, Sr e Zr, não estão explicadas pelos eixos retidos.

Tabela 6 – Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos

Eixo	Variável	Explicação
Eixo 1	Nd; Sm; Eu; Gd; Dy; Ho; Er; Yb; Lu; La; Ce; Co; Y; V	90,77 %
Eixo 2	Al ₂ O ₃ ; K ₂ O; FeO; Ga; Ni; MgO; Rb	5,76 %
Eixo 3	P ₂ O ₅ ; TiO ₂ ; Fe ₂ O ₃ ; CaO; SiO ₂	1,27 %
Eixo 4	MnO; Na ₂ O; Ba; Nb; Th; Cr	0,56 %

Fonte: dados da pesquisa.

Em relação às variáveis que compõem o eixo 1(Tabela 6), com exceção de Co, a porção positiva do eixo 1 é composta principalmente pelas modalidades de menor valor. Quando colocadas as variáveis em suplementar o diagrama (Figura 25A) nos mostra que somente Macau tem contribuição relativa na parte positiva do eixo 1 (Tabela 7). Já Fernando de Noronha (FN) e Fortaleza, que também tem forte contribuição relativa no eixo 1, relacionam-se com as modalidades de maior valor que formam este eixo na porção negativa do gráfico, exceto para a variável Co.

Essas associações indicam forte correlação entre si dos elementos terras raras (ETR) de menor concentração relativa com as amostras provenientes do vulcanismo Macau. De

maneira oposta, as amostras do vulcanismo FN estão correlacionadas às modalidades dos maiores valores de ETR. As amostras de Fortaleza também se correlacionam às modalidades de maior valor de ETR, de forma menos acentuada do que as de FN.

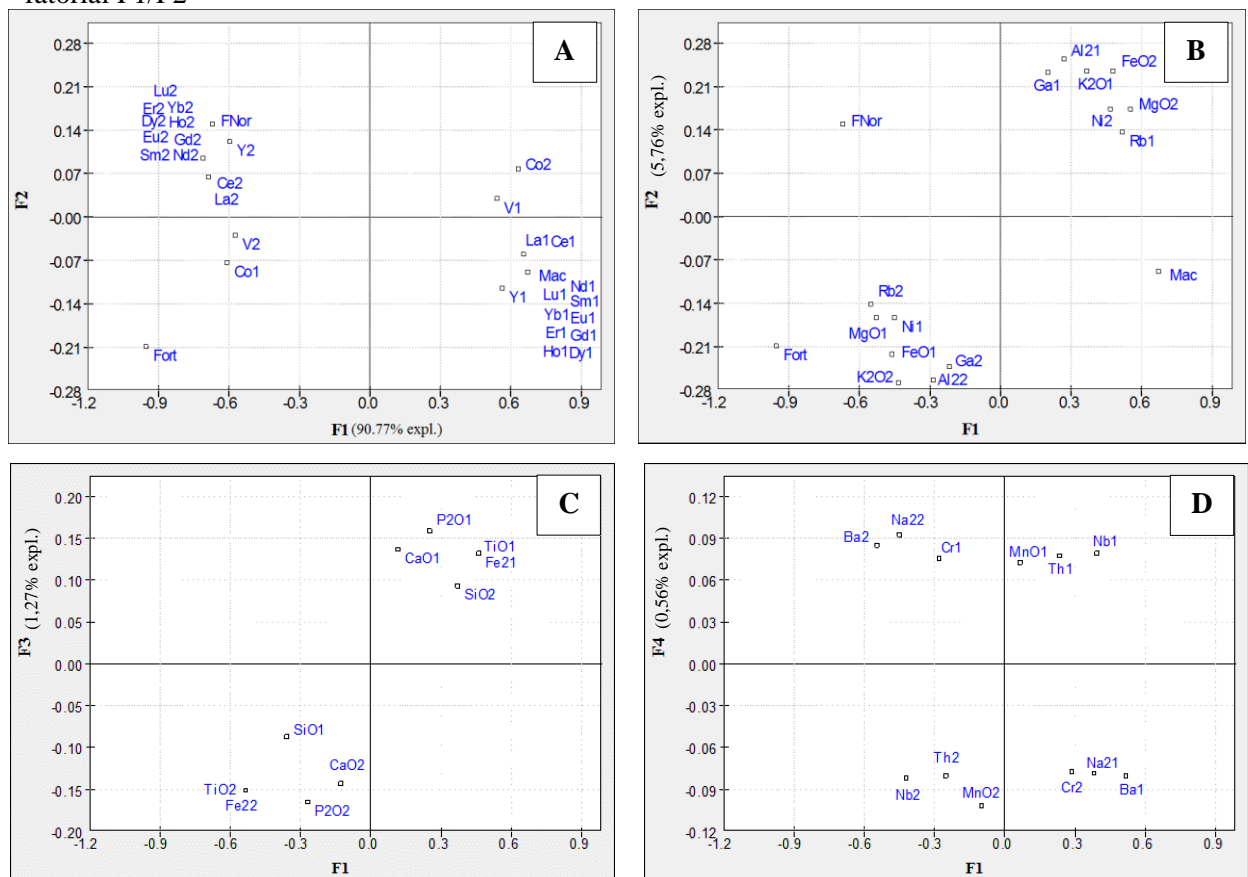
Tabela 7 – Contribuição relativa das variáveis suplementares

Variável	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
Fort	0,855383	0,041727	0,000196	0,008688
FNor	0,938783	0,04665	0,002584	0,00048
Mac	0,979585	0,017524	0,00198	0,000005

Fonte: dados da pesquisa.

Os ETR, assim como os elementos traço Y e V, tem suas modalidades de menor concentração correlacionadas aos indivíduos de Macau, enquanto para o Co são as modalidades de maiores valores. A recíproca é verdadeira para as amostras de FN e Fortaleza.

Figura 25 – Planos fatoriais F1/F2, F1/F3 e F1/F4 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para os eixos 1, 2, 3 e 4, com a representação das suplementares Fort, FNor e Mac no plano fatorial F1/F2



Fonte: dados da pesquisa.

Nota: Planos fatoriais F1/F2 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para o eixo 1 (A) 90,77% de explicação e (B) 5,76% de explicação para o eixo 2. C) Plano fatorial F1/F3 com 1,27% de explicação das modalidades de variáveis ativas contribuindo para o eixo 3. D) Plano fatorial F1/F4 no qual estão explicadas 0,56% das modalidades de variáveis ativas que contribuem para o eixo 4.

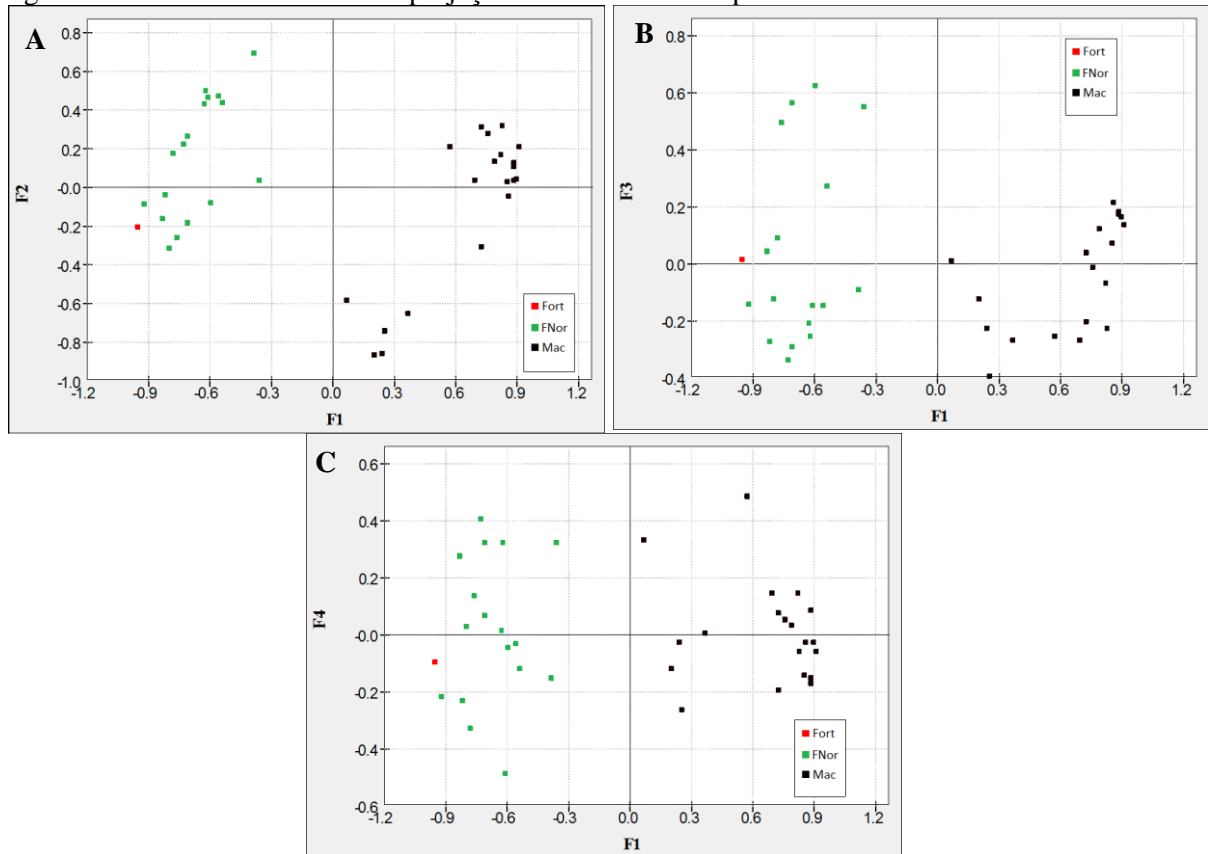
Os maiores valores de FeO, MgO e Ni, segundo esta divisão em modalidades estão relacionados a parte positiva do eixo 2, assim como os menores valores de Al₂O₃, K₂O, Ga e Rb (Figura 25B). Da mesma forma, os valores mais baixos de daquelas variáveis e os mais altos destas estão relacionados à porção negativa do eixo 2 (Figura 25B).

As modalidades de variáveis ativas, deste conjunto de dados, que contribuem negativamente para o eixo 3 (Figura 25C) são os maiores valores de P₂O₅, TiO₂ e Fe₂O₃ e os menores de SiO₂ e CaO, enquanto as modalidades opostas contribuem para a porção positiva deste eixo.

Em relação ao eixo 4, as modalidades de menor valor, deste conjunto de dados, de Th, Nb, Cr e MnO estão relacionadas a sua porção positiva, assim como a modalidade dos maiores valores de Na₂O e de Ba, ao passo que à sua porção negativa estão relacionadas as modalidades de maior valor Th, Nb, Cr e MnO e valores mais baixos de Na₂O e de Ba (Figura 25D).

Nos planos fatoriais onde estão representadas as correlações entre os indivíduos (Figura 26) destaca-se o distanciamento entre os indivíduos de Macau e os demais. Apesar de alguma dispersão ao longo dos eixos, indivíduos do mesmo grupo, geralmente, estão próximos entre si e os indivíduos de Fortaleza são mais correlacionáveis com indivíduos de Fernando de Noronha do que de Macau. Além disso, fica claro que os indivíduos de Fortaleza são tão correlacionáveis entre si que são, inclusive, projetados no mesmo ponto.

Figura 26 – Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos na primeira AFC



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: A) Plano fatorial F1/F2; B) Plano fatorial F1/F3; C) Plano fatorial F1/F4. Onde Fort= Fortaleza, FNor= Fernando de Noronha e Mac= Macau.

5.2.2 AFC 2 – elementos maiores ativos, traço e localização como suplementar

Na segunda AFC realizada, agora apenas com os elementos maiores ativos e todas as outras variáveis em suplementar, foram retidos apenas 2 eixos, com um total de 90.10% de explicação, sendo 71.14% desta explicação no eixo 1 e 18.96% no eixo 2. A tabela 8 apresenta quais variáveis ativas contribuem para cada um dos eixos retidos. A variável Al_2O_3 , apesar de ter maior contribuição absoluta no eixo 1 também apresenta boa contribuição para o eixo 2 e por isso foi analisada nos dois eixos. As variáveis ativas MnO e Na_2O não estão explicadas nestes eixos, estando, respectivamente, nos eixos 3 e 4, onde não podem ser satisfatoriamente correlacionadas com outras variáveis e, portanto, não terão seus planos fatoriais apresentados.

Nesta segunda análise a parte positiva do eixo 1 é composta pelas modalidades de maior valor de FeO (Fe^{2+}) e MgO e pelas modalidades de menor valor de K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 (Fe^{3+}) e Al_2O_3 , dentro deste conjunto de dados. A porção negativa deste eixo é composta pelas modalidades opostas às mencionadas, como pode ser observado na figura 27A. Todas as variáveis suplementares são projetadas no eixo 1.

Tabela 8 – Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos na segunda AFC

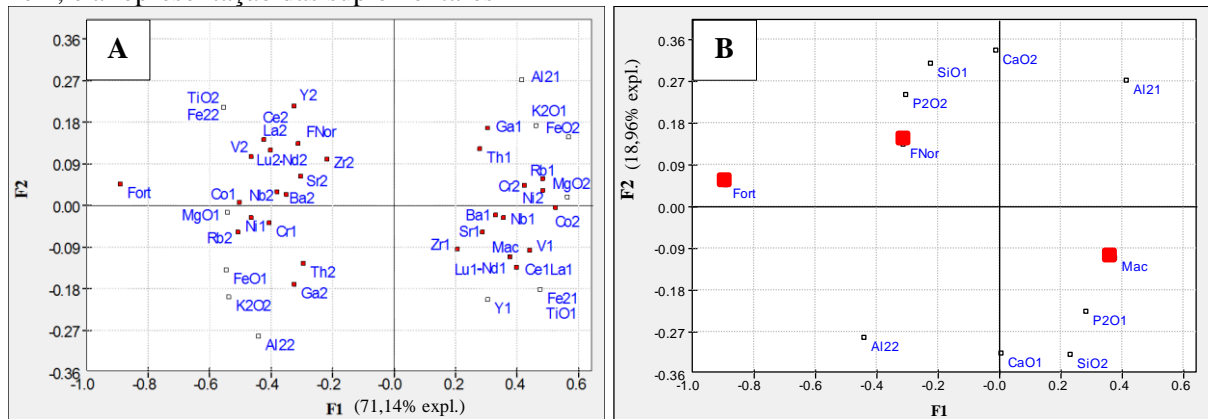
Eixo	Variável	Explicação
Eixo 1	FeO; MgO; K ₂ O; TiO ₂ ; Fe ₂ O ₃ ; Al ₂ O ₃	71,14 %
Eixo 2	SiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ; CaO; P ₂ O ₄	18,96 %

Fonte: dados da pesquisa.

Pode-se dizer que todas as variáveis colocadas em suplementar, nesta AFC, tem contribuição relativa no eixo 1, e as variáveis de localização, Fort e FNor correlacionam-se mais à porção negativa deste eixo, enquanto Mac correlaciona-se com sua porção positiva.

Os maiores valores de CaO e P₂O₅, segundo esta divisão em modalidades, estão relacionados a parte positiva do eixo 2, bem como os menores valores de SiO₂ e Al₂O₃ (Figura 27B). Da mesma forma, os valores mais baixos de daquelas variáveis e os mais altos destas estão relacionados à porção negativa do eixo 2 (Figura 27B).

Figura 27 – Plano fatorial F1/F2 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para os eixos 1 e 2, e a representação das suplementares

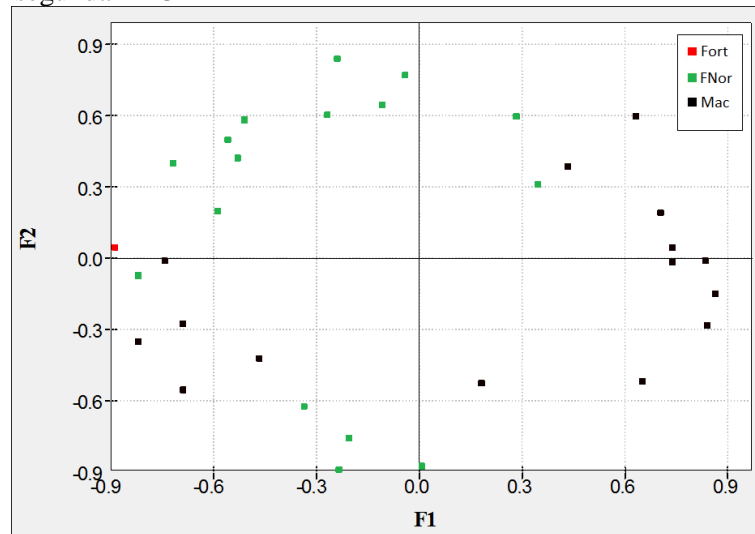


Fonte: dados da pesquisa.

Notas: a representação das suplementares são os pontos em vermelho. A) eixo 1 com 71,14%. B) eixo 2 com 18,96% de explicação.

A projeção dos indivíduos desta AFC (Figura 28) mostra a formação de quatro subgrupos, dois para Macau e dois para Fernando de Noronha. Os indivíduos de Fortaleza, além de permanecerem sempre juntos, representados pelo mesmo ponto, continuam associados à indivíduos de Fernando de Noronha.

Figura 28 – Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos na segunda AFC



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: Fort= Fortaleza, FNor= Fernando de Noronha e Mac= Macau.

5.2.3 AFC 3 – elementos traço ativos, maiores e localização como suplementar

A terceira AFC coloca os elementos traço como variáveis ativas e os elementos maiores juntamente com a localização como variáveis suplementares. Nesta análise foram retidos três eixos com um total de explicação de 99,09%, sendo 96,04% de explicação no eixo 1, 2,54% de explicação de no eixo 2 e 0,51% de explicação no eixo 3. A tabela 9 mostra quais as variáveis contribuem para cada um destes três eixos e as variáveis Zr e V não são explicadas em nenhum destes eixos.

Tabela 9 – Relação de variáveis que contribuíram para cada um dos eixos retidos na terceira AFC

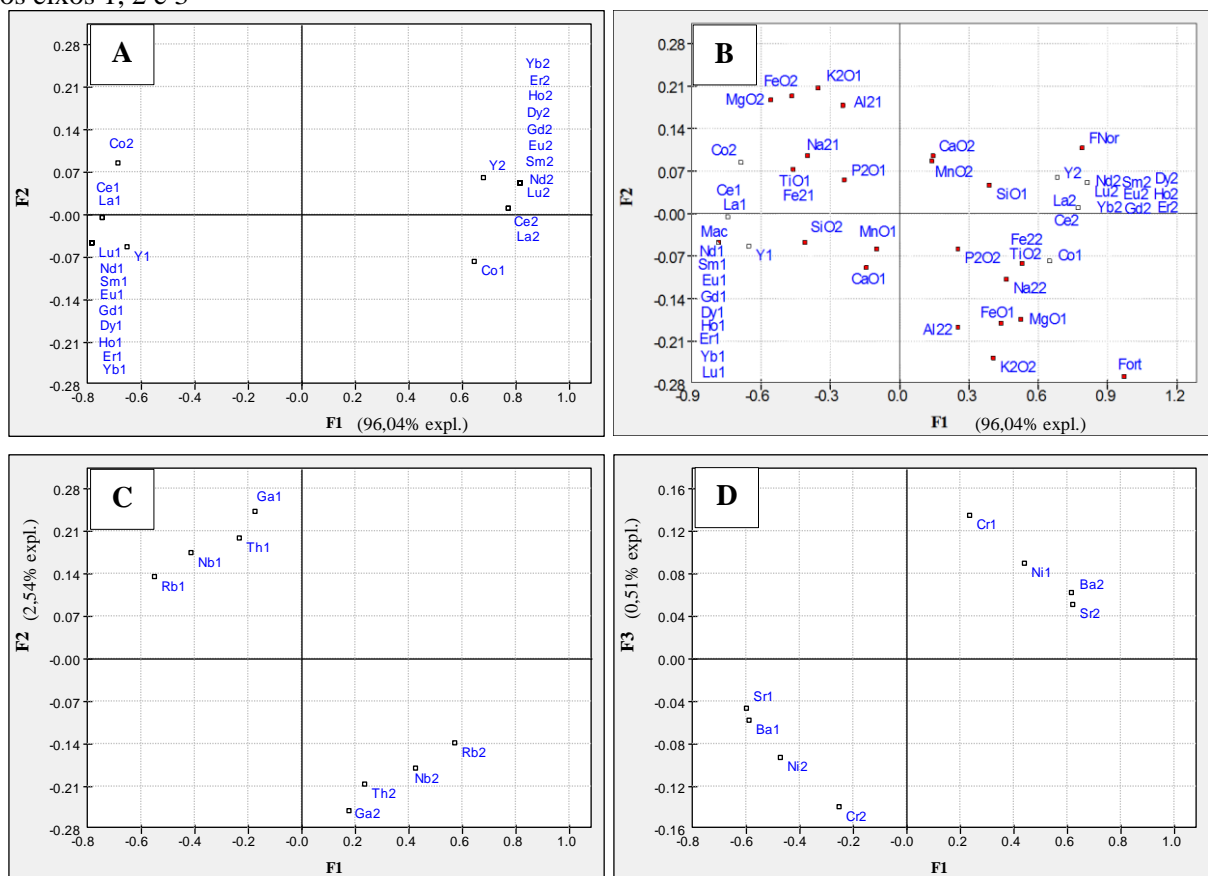
Eixo	Variável	Explicação
Eixo 1	Lu; Nd; Sm; Eu; Gd; Dy; Ho; Er; Yb; Lu; La; Ce; Co; Y;	96,04 %
Eixo 2	Ga; Th; Nb; Rb	2,54 %
Eixo 3	Cr; Ni; Ba; Sr	0,51 %

Fonte: dados da pesquisa.

Em relação ao eixo 1 da terceira AFC as modalidades de maior valor, deste conjunto de dados, de ETR e do elemento traço Y estão relacionadas a sua porção positiva, assim como a modalidade dos menores valores de Co, ao passo que à sua porção negativa estão relacionadas as modalidades de menor valor ETR e do Y e dos valores mais altos de Co (Figura 29A), dentro deste conjunto de dados.

Todas as variáveis em suplementar tem contribuição relativa com o eixo 1. Quando elas são projetadas no plano fatorial F1/F2 (Figura 29B) é possível perceber, em relação à origem das amostras, que somente Macau tem contribuição relativa negativa do eixo 1, já Fernando de Noronha e Fortaleza, tem contribuição relativa na porção positiva do eixo 1. Também fica claro que as relações encontradas entre as modalidades dos elementos maiores se mantem, quando estes estão como variáveis suplementares.

Figura 29 – Planos fatoriais F1/F2, e F1/F3 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para os eixos 1, 2 e 3



Fonte: dados da pesquisa.

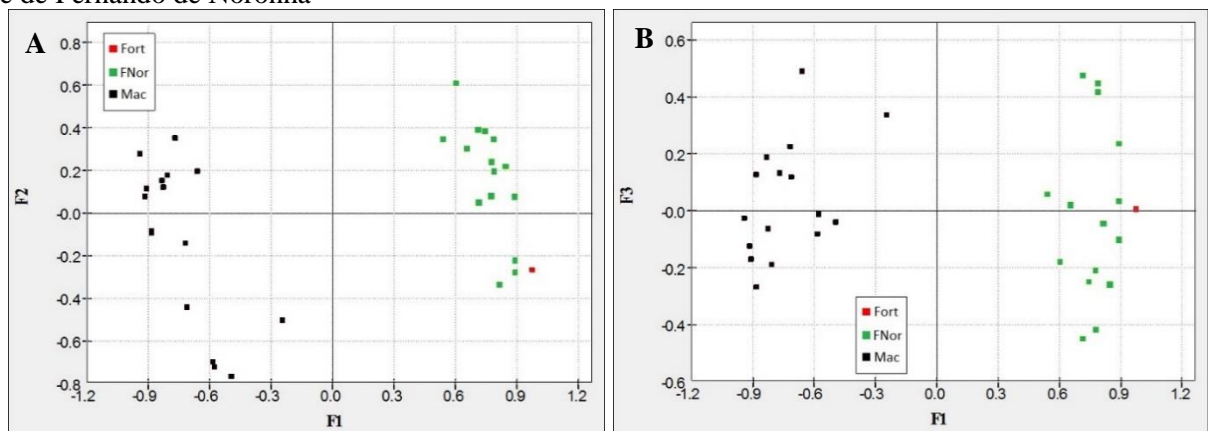
Notas: A) Plano fatorial F1/F2 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para o eixo 1 que tem 96,04% de explicação. B) Projeção das suplementares (pontos em vermelho) no eixo 1. C) Plano fatorial F1/F2 com as modalidades de variáveis ativas que contribuem para o eixo 2 (2,54% de explicação). D) Plano fatorial F1/F3 e suas respectivas modalidades de variáveis ativas que contribuem para o eixo 3 (0,51% de explicação).

Para o eixo 2 as modalidades de variáveis ativas, deste conjunto de dados, que contribuem em sua porção positiva (Figura 29C) são os menores valores de Ga, Th, Nb e Br, suas modalidades de maiores valores contribuem para a porção negativa deste eixo. Em relação ao eixo 3, as modalidades dos maiores valores de Ba e Sr e os menores de Cr e Ni, contribuem

para sua a porção positiva, enquanto as modalidades opostas contribuem para sua porção negativa (Figura 29D).

Os planos fatoriais onde são representados os indivíduos (Figura 30) da terceira AFC mostram, novamente, uma divisão entre os indivíduos Macau e os demais. É possível notar dois claros subgrupos. Os indivíduos de Fortaleza mostram-se mais próximos aos indivíduos de Fernando de Noronha, e dentro do conjunto Fortaleza seus indivíduos continuam projetados no mesmo ponto.

Figura 30 – Planos fatoriais com a projeção dos indivíduos na terceira AFC em dois subgrupos de Macau e de Fernando de Noronha



Fonte: dados da pesquisa.

Notas: Fort= Fortaleza, FNor= Fernando de Noronha e Mac= Macau.

5.3 Discussões – Análise de Correspondências

Embora nem todos os valores de ETR estejam representados pelo mesmo ponto eles tem comportamento muito similar no mesmo eixo e isso reflete suas propriedades químicas bastante similares (GILL, 1996). Nas três AFC os valores maiores dos ETR correlacionam-se com os maiores valores do elemento traço Y, que em sua forma iônica 3^+ tem o mesmo raio iônico do Ho^{3+} (GILL, 1996). Em todas as AFC o eixo 1 das variáveis suplementares (MELLINGER, 1984) mostra que Macau se enquadra no modelo das modalidades de menor valor de ETR. Já Fernando de Noronha correlaciona-se com as modalidades cujos valores de ETR são os maiores. As amostras do vulcanismo em Fortaleza, apesar de também estarem relacionadas às modalidades de maior valor de ETR, também estão influenciadas pela modalidade alta de V e pela modalidade baixa Co. Estas correlações são reforçadas principalmente na AFC 3. Em termos geoquímicos essa correlação de Macau com o eixo 1 e as modalidades que o constituem indica que as rochas deste vulcanismo são mais empobrecidas em elementos ETR relativamente aos outros dois vulcanismos.

Na ACP 1 as correlações dos valores mais altos, neste conjunto de dados, de FeO (Fe^{2+}), MgO e Ni, formadores da olivina (GILL, 2010; WALTHER, 2009), com as modalidades de mais baixo valor de Al_2O_3 e Ga, cujas valências são 3^+ apesar do raio iônico do Ga ser um pouco maior (WALTHER, 2009) e dos álcalis K_2O e Rb, constituintes dos feldspatos (GILL, 1996), indicam que nos indivíduos em que os teores de uma dessas associação é alta a outra é relativamente mais baixa. Estas relações permanecem na AFC 2, onde os elementos maiores são colocados como variáveis ativas.

A correlação entre CaO e P_2O_5 pode estar relacionada à cristalização de apatita, que é um mineral acessório, passível de ser cristalizado em magmas básicos alcalinos (Gill, 1996).

Elementos como Th e Nb fazem parte do chamado grupo *high field strength* (WALTHER, 2009), ou seja, tem carga iônica alta (4^+) e podem estar se substituindo em alguma fase mineral. A correlação entre Cr e Ni, ambos metais de transição, observada na AFC 3 também ocorre na primeira análise apesar de não ser tão forte, o Cr foi deixado para ser explicado no eixo 4 desta situação. O Ba e Sr além de serem, ambos, fortemente eletropositivos (2^+), são bastante reativos, podendo substituir-se devido a sua incompatibilidade em diversos minerais (WALTHER, 2009; GILL, 1996), eles se correlacionam na AFC 3. O Ba pode entrar na estrutura de K-feldspatos e biotita, enquanto o Sr acompanha o Ca em maiores quantidades nos plagioclásios e em menor quantidade nas apatitas. As modalidades que formam o eixo 4 na AFC 1 mostram uma semelhança em termos de contribuição absoluta, o que não implica em uma relação geoquímica para todas as variáveis.

Na projeção dos indivíduos da AFC 2 foram formados dois subgrupos de Fernando de Noronha e dois de Macau (Figura 28). Esta subdivisão é atribuída à variação mineralógica dentro de cada uma dessas unidades (MELLINGER, 1984). Na projeção dos indivíduos na AFC 1 apenas a localização é colocada como suplementar, enquanto na AFC 3 os elementos maiores também são colocados. Tanto a AFC 1 como a AFC 3 sugerem maior semelhança entre o vulcanismo Fortaleza e Fernando de Noronha.

6 CONCLUSÕES

A rocha vulcânica máfica subaflorante em Fortaleza além de alcalina é subsaturada em sílica, e classificada como basanita devido ao seu conteúdo em olivinas, que ultrapassa 10%. Devido à proximidade espacial da ocorrência em Fortaleza em relação aos corpos alcalinos félsicos do Vulcanismo Messejana esta ocorrência passa a integrar o Vulcanismo Messejana.

Este estudo demonstrou a similaridade entre as rochas dos vulcanismos Messejana e Fernando de Noronha a partir de sua análise petrológica e geoquímica. As rochas máficas são portadoras de olivinas, ricas em piroxênios e nefelina normativas e geoquimicamente as rochas félsicas apresentam enriquecimento em Th, U, Ta, Nb, La, Ce, Hf, Zr, Tb, Y e Yb, e depleções em Ba, K, Sr, P e Ti, enquanto as rochas máficas destes vulcanismos apresentam enriquecimento em Ba, Th, U, Ta, Nb, La, Ce, Nd e depleções em K, Sr e P, características que as aproximam dos padrões OIB e Crosta Continental. A sutil diferença entre os indivíduos de cada uma dessas suítes é atribuída a heterogeneidades no manto que deu origem a este magma.

O Vulcanismo Messejana possui indivíduos félsicos e máficos, assim como o Vulcanismo Fernando de Noronha, caracterizando-se um vulcanismo alcalino bimodal, com dimensão e volumes expressivos. Este trabalho leva a uma consideração de que o número de outros corpos vulcânicos, máficos ou félsicos, encobertos pela Formação Barreiras ou por sedimentos Quaternários seja muito maior, como por exemplo, a ocorrência dos traquitos no município de São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará, que poderiam ser tratados como componentes da Suíte Alcalina Messejana, mas que até o momento não foram estudados.

A AFC permitiu constatar que as amostras do vulcanismo subaflorante de Fortaleza se correlacionam mais com as amostras do Vulcanismo de Fernando de Noronha do que com as do Vulcanismo Macau, embora no Diagrama TAS as 41 amostras tenham sido classificadas como basanitos. Portanto, o tratamento estatístico permite que sejam identificadas pequenas variações internas dentro de um conjunto de rochas classificadas da mesma forma pela geoquímica convencional.

A possibilidade de comparação de dados quantitativos (análises químicas) e dados relativos à procedência (localização) das amostras permitiu relacionar características que geralmente não podem ser comparadas entre si de forma trivial e direta. Além disso, a AFC possibilitou a redução de um universo de 35 variáveis para poucos eixos (4, 2 e 3) em planos fatoriais em cada uma das análises. Destaca-se também a perspectiva para o mapeamento do comportamento de elementos traço em minerais acessórios que são vistos como ótimos indicadores petrogenéticos.

O fato de os indivíduos de Fortaleza serem projetados sempre no mesmo ponto indica a forte correlação entre as amostras do mesmo corpo e isso se deve à baixa variabilidade química das amostras e a forte homogeneidade mineralógica/química.

Os dados analisados no tratamento estatístico realizado confirmam aplicabilidade da AFC como um bom método de correlação de dados litogeoquímicos, pois permite relacionar os diversos elementos de uma análise química e mapear seu comportamento em diferentes grupos de rocha. Entretanto sua aplicação não isenta o uso dos diagramas clássicos de classificação no processo de identificação e caracterização petrogenética.

Embora sejam furos relativamente rasos foi possível identificar litotipos pouco estudados, como os indivíduos alcalinos máficos do Vulcanismo Messejana, e até mesmo desconhecidos na região, como o calcário basal. Certamente apenas estes dados não poderão esclarecer completamente relações de contatos, espessuras e geometria dos corpos, entretanto abrem uma porta para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; FILHO, J. S. O. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. In SBG/Núcleo Norte, Cong. Bras. Geol., 35, Belém, **Anais**, 2:753-760, 1988.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F. A Formação Barreiras. Revisão geológica da Faixa Sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Recife, UFPE/CT/CG. **Estudos Geológicos - Série B, Estudos e Pesquisas**, 10:77-88. 1991.
- ALMEIDA F.F.M. **Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha**. 1955. 181p. Monografia 13. DGM/DNPM, Rio de Janeiro, 1955.
- ALMEIDA F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Rev. Bras. Geociências**, 16:325-349, 1986.
- ALMEIDA F.F.M. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terræ Didactica**, 2(1):3-18, 2006.
- ALMEIDA F.F.M., HASUI Y. (eds.). **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo, Blücher Ltda, p. 378, 1984.
- ALMEIDA F.F.M., AMARAL G., CORDANI U.G., KAWASHITA K. The Precambrian evolution of the South America cratonic margin South of the Amazon River. In: A. E. M. Nairn & F. G. Stehli (eds.) **The ocean basins and margins**. New York, Plenum Publishing, p. 411-446, 1973.
- ALMEIDA F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. A. Províncias estruturais brasileiras. 8 Simpósio de Geologia do Nordeste, **Atas**, 363-391. Campina Grande: SBG/Núcleo Nordeste, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M., CARNEIRO, C.D.R., MACHADO JÚNIOR, D.L., DEHIRA, L.K. Magmatismo pós-Paleozóico no Nordeste Oriental do Brasil. **Rev. Bras. Geoc.**, 18(4):451-462, 1988.
- AMARAL, W. S. **Análise geoquímica, geocronológica e termobarométrica das rochas de alto grau metamórfico, adjacentes ao arco magmático de Santa Quitéria, NW da Província Borborema**. 2011. 248p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- ANCELMI, M. F.; SARAIVA DOS SANTOS, T. J.; REGINATO, R. A.; AMARAL, W. S.; MONTEIRO, L. V. S. Geologia da Faixa Eclogítica de Forquilha, Domínio Ceará Central, noroeste da Província Borborema. **Brazilian Journal of Geology**, 43(2):235-252, 2013.

ANDERSON D.L. The thermal state of upper mantle; no role for mantle plumes. **Geoph. Res. Lett.**, 27:3623-3626, 2000.

ANDERSON, D.L. Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle. **Elements** 1:271-275, 2005.

ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, 8(1):127-141, 1994.

ARAÚJO, A.L.N., CARLSON, R.W., GASPAR, J.C., BIZZI, L.A. Petrology of kamafugites and kimberlites from the Alto Paranaíba Alkaline Province, Minas Gerais, Brazil. **Contrib. Mineral. Petrol.** 142:163-177, 2001.

ARTHAUD, M.H. **Evolução neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira**. 2008. 130p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2008

ARTHAUD, M.H., CABY, R., FUCK, R.A., DANTAS, E.L., PARENTE, C.V. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and Its Correlation with Nigeria, NW Africa. **Geological Society, London, Special Publication**, 294:49-67, 2008.

BRANDÃO, R. L. Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza. **Relatório**. Projeto SINFOR: CPRM. 108p., 1998.

BRANDÃO, R. L. Mapa geológico da Região Metropolitana de Fortaleza. **Texto explicativo**. Projeto SINFOR: CPRM. 46p., 1995.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria-Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SA, 24 **Fortaleza: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro. 488p., 1981.

BRITO NEVES, B.B., CORDANI, U.G. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. In: *Crustal Evolution in the Late Proterozoic* (edited by R.J. Stern and W.R. Van Schmus), **Precambrian Research**, 53:23-40, 1991.

CABANIS, B., LECOLLE, M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: Un outil pour la discrimination des series volcaniques et lamise en evidence des processus demelange et/ou de contamination crustale. **Compte Rendus de l'Académie des Sciences Series II**, 309:2023-2029, 1989.

CABY, R. Precambrian terranes of Benin Nigeria and Northeast Brazil and the Late Proterozoic South Atlantic fit. **Geological Society of America Special Paper** 230:145-158, 1989.

CABY R., ARTHAUD M.H. Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, northeast Brazil. **Geology**, 14(10):871, 1986.

- CHANG, H.K., KOWSMANN, R.O., FIGUEIREDO, A.M.F., BENDER, A.A. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system: an overview. **Tectonophysics** 213, 97–138, 1992.
- CONDÉ, V.C., LANA, C. C., PESSOA NETO, O. C., ROESNER, E. H, MORAIES NETO, J. M., DUTRA, D. C. B. Bacia Ceará. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, 15(2):347-355, 2007.
- CORDANI, U.G. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. **Bol. Inst. Geoc. Astron.** USP. São Paulo, 1:9-75, 1970.
- CORDANI U.G., AMARAL G., KAWASHITA K. The Precambrian evolution of South America. **Geologische Rundschau**, 62:309-317, 1973.
- CORDANI U.G., MELCHER G.C., ALMEIDA F.F.M. Outline of the Precambrian geochronology of South America. **Canadian Journal of Earth Sciences**, 5:629-632, 1968.
- COSTA P.R.C., ANTUNES A.F., SÁ E.F.J. DE, AMARO V.E., MATOS R.M.D.DE. O registro da deformação mesozóica relacionada à abertura da margem equatorial atlântica no litoral do Estado do Ceará (Nordeste do Brasil): evidências a partir da análise de imagens orbitais e de afloramentos. In: Cong. Bras. Geol., 41, **Anais**, João Pessoa SBG. p. 623, 2002.
- COURTILLOT V., DAVAILLE A., BESSE J., STOCK J. Three distinct types of hotspot in the Earth's mantle. **Earth. Planet. Sci. Lett.**, 205:295-308, 2003.
- COX, K.G., BELL, J.D.; PANKHURST, R.J. **The Interpretation of Igneous Rock**. Allen & Unwin, London. 450 p.,1979.
- DAVIES, G. F. Ocean bathymetry and mantle convection: 1. Large-scale flow and hotspots. **Jour. of Geophysical Research**, 93(89):10467-10480, 1988.
- DUNHAM, R.J. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In Ham, W.E., Ed., **Classification of Carbonate Rocks**, American Association of Petroleum, Geologists Memoir 1, 108-121, 1962.
- ERNESTO, M. Paleomagnetism of the post-Paleozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform: questioning the mantle-plume model. In: P. Comin-Chiaramonti; C. B. Gomes, eds. **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform**. São Paulo, Edusp/Fapesp. 689-705, 2005.
- FERREIRA DA SILVA, E.; FREIRE ÁVILA, P.; SALGUEIRO, A. R.; CANDEIAS, C.; GARCIA PEREIRA, H. Quantitative-spatial assessment of soil contamination in S. Francisco de Assis due to mining activity of the Panasqueira mine (Portugal). **Environmental Science and Pollution Research (online)**, 20: 7534-7549, 2013.
- FETTER, A. H., VAN SCHMUS, W. R., SARAIVA DOS SANTOS, T. J., NOGUEIRA NETO, J. A., ARTHAUD, M. H. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW

Borborema Province, NE Brazil: Implications for the existence of the Paleoproterozoic Supercontinent "Atlantica". **Rev. Bras. Geo.** 30 (1): 102-106, 2000.

FODOR R.V., MUKASA S.B., SIAL A.N. Isotopic and trace-element indications of lithospheric and asthenospheric components in Tertiary alkalic basalts, northeastern Brazil. **Lithos**, 43:197-217, 1998.

GILL, R. **Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide**. Chichester, Wiley-Blackwell. 438 p., 2010.

GILL, R. **Chemical fundamentals of geology**. 2nd ed. London, Chapman & Hall. 296 p., 1996.

GOMES, J.R.C.; GATTO, C.M.P.P.; SOUZA, G.M.C.DE; LUZ, D.S. DA; PIRES, J.L.; TEIXEIRA, W.; FRANCA, F.A.B.DE; CABRAL, E.M.A.; MENOR, E.A.; MONTEIRO, N.; BARROS, M.J.G.; RIBEIRO, E.G.; LIMA, E.A.DE; FONSECA, R.A.DA. GEOLOGIA. In: PROJETO RADAMBRASIL. **Folhas SB.24/25 Jaguaribe e Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: MME/Secretaria Geral. (Lev. Rec. Nat. 23), 27-300, 1981.

GOMES, P. O; GOMES, B. S.; PALMA, J. J.; JINNO, K.; SOUZA, J. M. Ocean-continent transition and tectonic framework of ocean crust at the continental margin off NE Brazil: results of LEPLAC Project. In: Mohriak Wu; Talwani M. (Editors). **Atlantic Rifts and Continental Margins**. Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, 115:261-291, 2000.

GORINI, M.A, BRYAN G.M. A semi-isolated basin off the northeast brazilian margin. **Amer. Geoph. Union Trans.**, 55:278, 1974.

GUIMARÃES I.P.; SIAL A.N.; SILVA FILHO A.F. Petrologia e geoquímica da província alcalina terciária Fortaleza, Ceará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador, 1982. **Anais**, Salvador, SBG, p. 577-588, 1982.

HAIR, J.F.J.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre, Bookman. 688p., 2009.

HOWARTH R.J.; SINDING-LARSEN R. Multivariate analysis, in Handbook of exploration geochemistry. In: GOVETT, G.J.S(ed.). **Statistics and data analysis in geochemical prospecting**. Vol. 2. Elsevier, 1983.

IRVINE, T.N. AND BARAGAR, W.R.A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. **Canadian Journal of Earth Science**, 8: 523-548, 1971.

KING, S.D. Hotspots and edge-driven convection. **Geology** 35:223-226, 2007.

KING, S.D., ANDERSON, D.L. Edge-driven convection. **Earth and Planetary Science Letters**, 160:289–296, 1998.

KING, S.D., RITSEMA, J. African hot spot volcanism: small-scale convection in the upper mantle beneath cratons. **Science**, 290:1137–1140, 2000.

KNESEL, K.M., DE SOUZA, Z.S., VASCONCELOS, P.M., COHEN, B.E., SILVEIRA, F.V. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology reveals the youngest volcanism in mainland Brazil and no evidence for a plume trace on the continent. **Earth and Planetary Science Letters**, 302:38–50, 2010.

LE BAS, M.J., LE MAITRE, R.W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. **Journal of Petrology**, 27:745-750,1986.

LE MAITRE, R. W. The chemical variability of some common igneous rocks. **Journal of Petrology** 17: 589-637, 1976.

LE MAITRE, R. W. **Igneous rocks – a classification and glossary of terms. Recommendations of the IUGS subcommission on the Systematics of Igneous Rocks**. Cambridge, Cambridge University Press. 2nd edition, 2002.

LIMA, M. DA G.; VASCONCELOS, P.; FARLEY, K.; JARDIM DE SÁ, E. F. Datação do Intemperismo Impõe Limites na Idade da Formação Barreiras, Bacia Potiguar Nordeste do Brasil. Datação do Intemperismo Impõe Limites na Idade da Formação Barreiras, Bacia Potiguar Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Estudos Quaternário, 2007, Belém. **Anais...** Congresso Brasileiro de Estudos Quaternário, 2007.

LOPES R.P. **O vulcanismo do Arquipélago de Fernando de Noronha, PE: química mineral e geoquímica**. 2002. 114p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, 2002.

LOPES, R. P., ULBRICH, M. N. C. Geochemistry of the alkaline volcanic-subvolcanic rocks of the Fernando de Noronha Archipelago, southern Atlantic Ocean. **Braz. J. Geol. [online]** 45(2):307-333, 2015.

MACCIOTTA G., ALMEIDA A., BARBIERI M., BECCALUVA L., BROTZU P., COLTORTI M., CONTE A., GARBARINO C., GOMES C.B., MORBIDELLI L., RUBERTI E., SIENA E., TRAVERSA G. Petrology of the tephritephonolite and cognate xenoliths of the Fortaleza district (Ceara, Brazil) **Europ. J. Miner.**, 2:687-709, 1990.

MARTINS, G., BELLINI, G., COMIN-CHIARAMONTI, P., MELFI, A.J., MACEDO, M.H.F., PICCIRILLO, E.M. O enxame de diques máficos mesozóicos Rio Ceará-Mirim -Nordeste do Brasil. In: **Workshop Diques Máficos Pré-cambrianos do Brasil**, 1, São Paulo. Projeto PICG - 257, IUGS-UNESCO. 1989.

MELLINGER, M. Correspondence analysis in the study of lithochemical data: general strategy and the usefulness of various data-coding schemes. **Journal of Geochemical Exploration**, 21: 455-469, 1984.

MIYASHIRO, A. Classification, characteristics, and origin of ophiolites. **Journal of Geology**, 83, 249-281, 1975.

- MIZUZAKI A.M.P.; THOMAS FILHO A. O magmatismo pós-paleozóico no Brasil. In: MANTESSO-NETO V.; BARTORELLI A.; CARNEIRO C.D.R.; BRITO NEVES B.B. (Eds.). **Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca. p. 471-486, 2004.
- MIZUSAKI, A. M. P.; THOMAZ FILHO, A.; MILANI, E. J.; CÉSERO, P. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in the northeastern region of Brazil, South America. **Journal of South America Earth Sciences**, 15:183-198, 2002.
- MONTELLI, R., NOLET, G., DAHLEN, F.A., MASTERS, G. A catalogue of deep mantle plumes: new results from finite-frequency tomography. **Geochem. Geophys. Geosyst.** 7(11):1-69, 2006.
- MULLEN, E.D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A Minor Element Discriminant for Basaltic Rocks of Oceanic Environments and Its Implications for Petrogenesis. **Earth and Planetary Science Letters**, 62:53-62, 1983.
- NGONGE, E. D.; HOLLANDA, M. H. B. M.; ARCHANJO, C. J.; OLIVEIRA, D. C.; VASCONCELOS, P. M. P.; MUÑOZ, P. R. M. Petrology of continental tholeiitic magmas forming a 350-km-long Mesozoic dyke swarm in NE Brazil: Constraints of geochemical and isotopic data. **Lithos**, 258-259:228-252, 2016a.
- NGONGE, E.D., HOLLANDA, M.H. B. M.; PIMENTEIL, M. M., OLIVEIRA, D. C. Petrology of the alkaline rocks of the Macau Volcanic Field, NE Brazil, **Lithos – online**, 2016b.
- OLIVEIRA, D. C. Evolução Magmática da Bacia Potiguar. In Congresso Brasileiro de Geologia, 40. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1998. 1:102, 1998.
- OLIVEIRA, D. C. New data on the relative-age and petrochemistry of the Magmatic Cuó event (Potiguar Basin; Northeast Brazil). In: SBG/Núcleo Sudeste, International Geological Congress., 31, Rio de Janeiro, **Anais...** CD-ROM. 2000.
- OLIVEIRA, J. F. **Contribuições dos métodos geofísicos (magnetometria, gravimetria e eletrorresistividade) à geologia da região metropolitana de Fortaleza**. 1998. 106p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1998.
- PEARCE J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust: **Lithos**, 100:14-48, 2008.
- PEREIRA, H. G.; SOUSA, A. J. Tratamento de Quadros Multidimensionais. Acesso em 20 de novembro de 2016, <http://biomonitor.ist.utl.pt/~ajsousa/AnalDadosTratQuadMult.html>. CVRMUTL, 105p., 1988.
- PERLINGEIRO, G., VASCONCELOS, P.M., KNESEL, K.M., THIEDE, D.S., CORDANI, U. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Fernando de Noronha Archipelago and

implications for the origin of alkaline volcanism in the NE Brazil. **Jour. Volcanology and Geothermal Research**, 249:140-154, 2013.

PESSOA NETO O.C., SOARES U.M., DA SILVA J.G.F., ROESNER E.H., FLORENCIO C.P., DE SOUZA C.A.V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 15(2): 357-369, 2007.

RAO, A. B.; SIAL A. N. Observations on alkaline plugs near Fortaleza city. Ceará State, Brazil. 24th International Geological Congress, **Anais...** 14, 56-60, 1972.

RITSEMA, J., VAN HEIJST, H.J., WOODHOUSE, J.H. Complex shear velocity structure beneath Africa and Iceland. **Science** 286:1925–1928, 1999.

RIVALENTI, G., MAZZUCHELLI, M., GIRARDI, V.A.V., VANNUCCI, R., BARBIERI, M.A., ZANETTI, A., GOLDSTEIN, S.L. Composition and processes of the mantle lithosphere in northeastern Brazil and Fernando de Noronha: evidence from mantle xenoliths. **Contrib. Mineral. Petrol.** 138:308–325, 2000.

RIVALENTI, G., ZANETTI, A., GIRARDI, V.A.V., MAZZUCHELLI, M., TASSINARI, C.C.G., BERTOTTO, G.W. The effect of the Fernando de Noronha plume on the mantle lithosphere in north-eastern Brazil. **Lithos** 94:111–131, 2007.

RODRIGUES, M. F.B. **Rochas basálticas do Rio Grande do Norte e Paraíba**. 1979. 62p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1979.

ROLLINSON, H. R. **Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation**. London (Longman Scientific and Technical). 352 p., 1993

SALGUEIRO, A. R.; PEREIRA, H. G.; RICO, M.T.; BENITO, G.; DÍEZ-HERREO, A. Application of Correspondence Analysis in the Assessment of Mine Tailings Dam Breakage Risk in the Mediterranean Region. **Risk Analysis**, 28: 13-23, 2008.

SALGUEIRO, A. R.; MACHADO, M. J.; BARRIENDOS, M.; PEREIRA, H. G.; BENITO, G. Flood magnitudes in the Tagus River (Iberian Peninsula) and its stochastic relationship with daily North Atlantic Oscillation since mid-19th Century. **Journal of Hydrology**, 502: 191-201, 2013.

SANTOS, T.J.S., NOGUEIRA NETO, J.A., FETTER, A.H., HACKSPACHER, P.C. Petrografia e Litogeoquímica das Rochas do Embasamento Cristalino da Região de Granja – CE. **Revista de Geologia**, 14: 33-48, 2001.

SCHOBENHAUS C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. **Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área de ocorrência incluindo depósitos minerais, escala 1:2.500.000**. Brasília, Ministério de Minas e Energia/DNPM. 501p., 1984.

SCHOBENHAUS C., BRITO NEVES B.B. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. In: L.A. Bizzi, R.M. Vidotti e J.H. Gonçalves (eds.).

Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, p. 26-54, 2003.

SIAL A.N. The Tertiary alkaline province of Fortaleza, State of Ceará, Brazil: oxygene isotopes and REE- geochemistry. **Geoch. Brasil**, 1:41-51, 1987.

SIAL, A.N., LONG, L.E., PESSOA, D.A.R., KAWASHITA, K. Potassium-argon ages and strontium isotope geochemistry of Mesozoic and Tertiary basaltic rocks, Northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 53:115–122, 1981.

SILVEIRA, F. V. **Magmatismo cenozoico da porção central do Rio Grande do Norte, NE do Brasil.** 2006. 195p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

SLEEP, N.H. Fate of mantle plume material trapped within a lithospheric catchment with reference to Brazil. **Geochem. Geophys. Geosyst.** 4:8509–8526, 2003.

SOFTWARE ANDAD. Versão 7.12. **Copyright (CVRM/IST) 2000.** Made by Pedro Sousa & Jorge Sousa, 2000.

SOUSA, D. C. **Litoestratigrafia e deformação cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil).** 2002. 189 p. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

SOUZA, Z.S., VASCONCELOS, P.M.P., NASCIMENTO, M.A.L., SILVEIRA, F.V., PAIVA, H.S., DIAS, L.G.S., THIEDE, D., CARMO, I.O., SOUZA, Z.S., VASCONCELOS, P.M.P., NASCIMENTO, M.A.L., SILVEIRA, F.V., PAIVA, H.S., DIAS, L.G.S., THIEDE, D., CARMO, I.O. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Mesozoic and Cenozoic magmatism in NE Brazil. **Short Papers-IV South Amer. Symposium on Isotope Geol**, pp. 691–694, 2003.

SUN, S.S. AND MCDONOUGH, W.F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D. and Norry M.J., Eds., **Magmatism in the Ocean Basins**, Vol. 42, Geological Society, London, Special Publications, 313-345, 1989.

SYKES L.R. Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. **Rev. Geophys. and Space Phys.**, 16(4):621-687, 1978.

TASSINARI, C.C.G., TEIXEIRA, W., SIGA JR. O. Considerações cronoestratigráficas da região da chapada do cachimbo e Dardanelos. In: Cong. Bras. Geologia, 30. Recife, SBG, **Anais**, 1:77-490, 1978.

TAYLOR, S.R. AND MCLENNAN, S.M. The geochemical evolution of the continental crust. **Reviews in Geophysics** 33:241-265, 1995.

THOMAZ FILHO, A. Datações radiométricas de rochas ígneas básicas da bacia do Ceará. Rio de Janeiro. Petrobrás/Cenpes. **Rel. interno, Cenpes**, 673-4462, 1983.

TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana (2000-500 Ma): Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa**. A.A. Balkema, Rotterdam, 350 p, 1994.

ULBRICH, M.N.C. Petrography of alkaline volcanic–subvolcanic rocks from the Brazilian Fernando de Noronha Archipelago, Southern Atlantic Ocean. **Geochimica Brasiliensis** 8 (1):21–29, 1993.

VALENCHON, F. The Use of Correspondence Analysis in Geochemistry. **Mathematical Geology**, 14 (4): 331-342, 1982.

VALLANCE, T. G. Spilitic degradation of a tholeiitic basalt. **Journal Petrology**, 15, 79-96, 1974.

VAN SCHMUS, W.R., BRITO NEVES, B.B., HACKSPACHER, P., BABINSKI, M. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of eastern Borborema Province, northeastern Brazil: initial conclusions. **J. South Am. Earth Sci.** 8:267–288, 1995.

VAN SCHMUS, W.R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B.B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. **J. South Am. Earth Sci.** 31:227-252, 2011.

VANDOROS P., OLIVEIRA M.A.F. Sobre o fonólito de Mecejana, Ceará. **An. Acad. brasil. Ciênc.**, 40(2):203-206, 1968.

VOGT, P.R. Bermuda and Appalachian-Labrador rises: common non-hotspot processes? **Geology**, 19:41–44, 1991.

WALTHER, J. V. **Essentials of Geochemistry**. Jones & Bartlett Publishers. 797 p., 2008.

WERNECK, L.S; MAGINI, C. Avaliação petrológica e geoquímica do basanita subaflorante no Município de Fortaleza (CE) e sua correlação com o vulcanismo de Fernando de Noronha, Brasil. **Revista de Geologia (UFC)**, 30 (2): xxxx. 2017.

WOHLETZ, K. KWare Magma: calculates IUGS volcanic rock classification, densities and viscosities. Geological Software. **Versão 2.50.0133**. 2016.

**ANEXO A – OFÍCIO 122/2015/DOS/SEINFRA – CONDIÇÕES DE ACESSO AOS
TESTEMUNHOS DE SONDAGEM DA OBRA DA LINHA LESTE DO METRÔ DE
FORTALEZA**



**GOVERNO DO
ESTADO DO CEARÁ**
Secretaria da Infraestrutura

Ofício nº 122 /2015/DOS/SEINFRA

Fortaleza, 11 de Setembro de 2015.

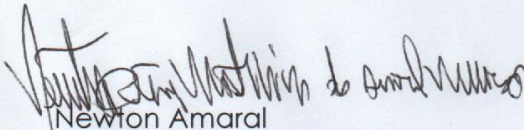
A
Luiza Silva Werneck
Geóloga

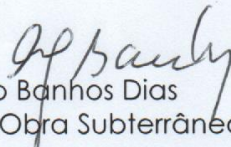
Prezada Senhora,

Ao cumprimentá-la cordialmente, em resposta ao Ofício encaminhado à Secretaria das Cidades, em 02 de Julho de 2015, sob nº do processo 4935417/2015, solicitando acesso as amostras obtidas a partir dos furos de sondagem realizados para a Obra da Linha Leste do Metrô de Fortaleza, informamos que o Consórcio executor desta Obra atenderá vossa solicitação, sob as seguintes condições:

- A. O acesso às sondagens deverá ser acompanhado por colaborador do Consórcio;
- B. Caso haja necessidade da retirada de alguma amostra, será necessária autorização escrita da SEINFRA que é, em última análise, a proprietária das amostras;
- C. Os relatórios adicionais que forem produzidos deverão ser entregues à SEINFRA e ao Consórcio.

Atenciosamente,


Newton Amaral
Gerência de Túneis/DOS


Maurílio Banhos Dias
Diretor de Obra Subterrânea/DOS

**ANEXO B – CONFIRMAÇÃO DE ACEITE DO ARTIGO “AVALIAÇÃO
PETROLÓGICA E GEOQUÍMICA DO BASANITO SUBAFLORENTE NO
MUNICÍPIO DE FORTALEZA (CE) E SUA CORRELAÇÃO COM O VULCANISMO
DE FERNANDO DE NORONHA, BRASIL” PELA REVISTA DE GEOLOGIA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
REVISTA DE GEOLOGIA(UFC)
<http://www.periodicos.ufc.br/index.php/geologia>



CARTA DE ACEITAÇÃO

Fortaleza, 31 de outubro de 2017.

Prezados Autores: Luiza Silva Werneck, Christiano Magini

Comunicamos que o artigo completo, intitulado "Avaliação petrológica e geoquímica do basanito subaflorante no Município de Fortaleza (CE) e sua correlação com o vulcanismo de Fernando de Noronha, Brasil" foi aceito para publicação no volume 30 (2), de 2017 da Revista de Geologia (UFC).

Agradecemos a submissão do referido trabalho a nossa Revista e esperamos contar com futuras contribuições de V.Sa. bem como sua divulgação nos meios científicos que lhe são comuns.

Atenciosamente,

Dra. Cynthia Romariz Duarte
Editora – Chefe