

Universidade Federal de Minas Gerais  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Mariana de Resende Machado

**O PAPEL DA AVIFAUNA NA TRANSFORMAÇÃO GEOQUÍMICA  
DE SUBSTRATOS NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL**

Defesa de Dissertação: Geografia

Belo Horizonte  
2016

Mariana de Resende Machado

**O PAPEL DA AVIFAUNA NA TRANSFORMAÇÃO GEOQUÍMICA  
DE SUBSTRATOS NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Geografia e Análise Ambiental

Linha de pesquisa: Meio ambiente, paisagem e desenvolvimento sustentável

Orientador: Prof. Doutor Fábio Soares de Oliveira

Belo Horizonte  
2016

M149p  
2016

Machado, Mariana de Resende.

O papel da avifauna na transformação geoquímica de substratos na Ilha da Trindade, Atlântico Sul [manuscrito] / Mariana de Resende Machado. – 2016.

xiii, 92 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Fábio Soares de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2016.

Área de concentração: Geografia e Análise Ambiental.

Linha de pesquisa: Meio ambiente, Paisagem e Desenvolvimento Sustentável.

Inclui bibliografias.

1. Ciência do solo – Trindade, Ilha da (ES) – Teses. 2. Geoquímica – Trindade, Ilha da (ES) – Teses. 3. Ave – Trindade, Ilha da (ES) – Teses. 4. Substratos – Trindade, Ilha da (ES) – Teses. 5. Ilhas – Atlântico, Oceano – Teses. I. Oliveira, Fábio Soares de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 631.4(815.2)

*Somewhere over the earth  
A song, a song  
Somewhere I have heard  
My brother is gone  
Away, under the moon  
Brother, brother  
Away, gone so soon  
Please singin his tune  
Still singin his tune*

*And away he gone day  
And away he gone night  
And away he gone dark  
And away he gone light  
Up and away he gone away  
But in a way he gonna stay  
Oh brother of mine  
We'll be singing some day  
Oh we'll be singing someday  
Undead audio, yes we'll be singing someday*

Eduardo Felipe Machado da Costa (*in memoriam*)  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

São tantas as pessoas cujas contribuições foram essenciais para que esse trabalho se materializasse do plano das ideias para o plano do real, que poucas palavras e uma página não são suficientes para expressar o sentimento de gratidão necessário.

Como sempre, o apoio emocional de minha mãe, pai e irmã é digno de perfazerem os primeiros a receberem todo o sentimento de gratidão. No entanto, todos tiveram participação mais efetiva. Ana Maria com suas eternas cobranças, preocupação com prazos e sugestões metodológicas e busca por laboratórios. Tudo o que uma filha de mãe pesquisadora poderia esperar. Juliana com seus debates teóricos sobre colonizações pré-históricas em ilhas oceânicas (que não especificamente é objeto dessa pesquisa, mas ainda sim é objeto de minha curiosidade). E Adelmo com seu interminável apoio logístico desde sempre, sendo o oficial transportador, pulverizador e moedor de amostras.

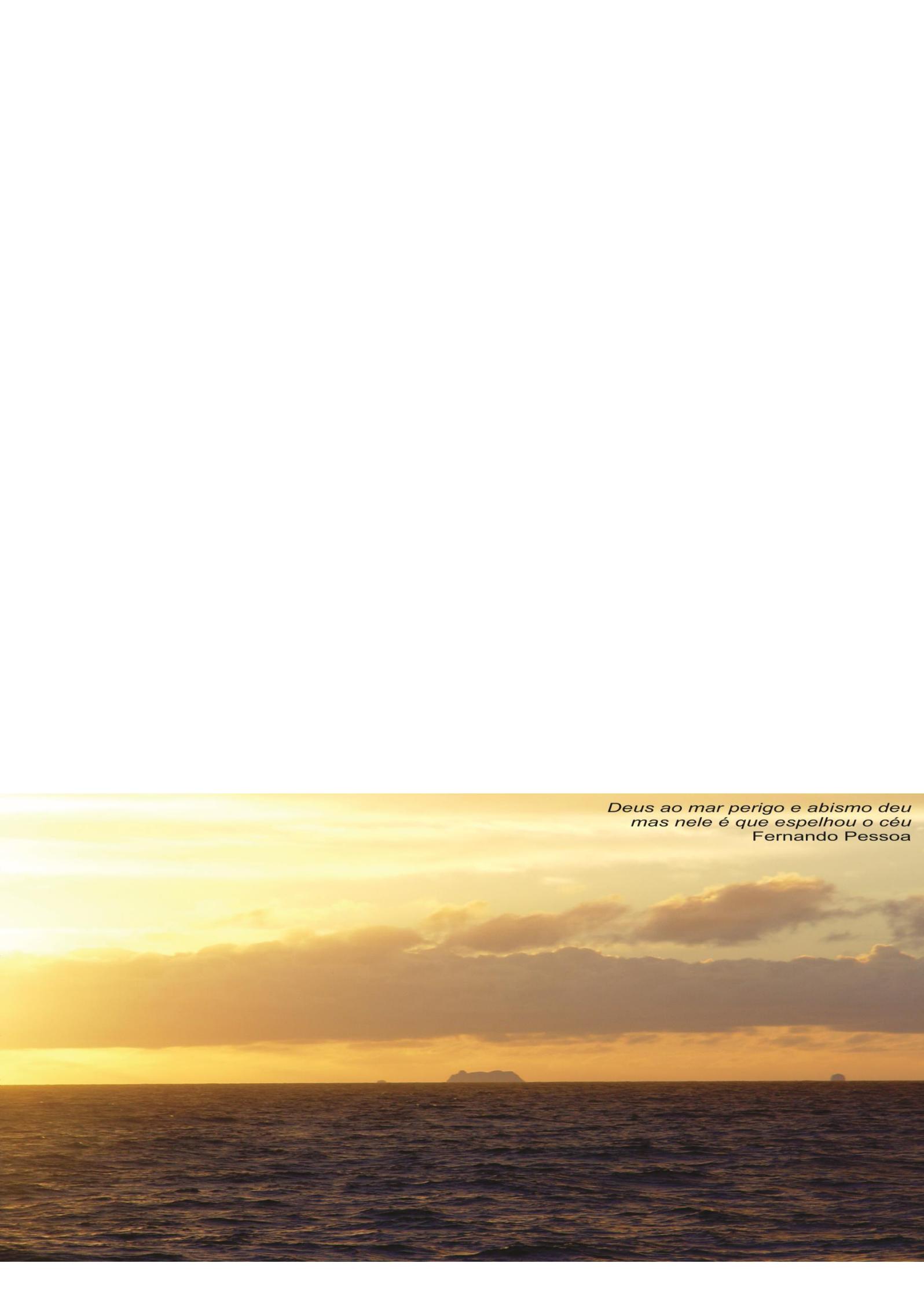
Ao meu querido e companheiro desde tempos de graduação. Com quem divido os mesmos anseios, as mesmas questões, as mesmas angústias e frustrações, assim como os mesmos entusiasmos, as muitas conquistas, as maiores felicidades. Vantagens de quem namora um também mestrando geógrafo. Fabrício, obrigada por tudo.

A minha querida família, obrigada pela compreensão nas constantes ausências, obrigada pelo apoio nos momentos mais difíceis, obrigada por me permitir fazer parte de tudo o que somos. Tenho o orgulho e o privilégio de ter vocês.

O mesmo sentimento guardo pela família que escolhi fazer parte, meus amigos cultivados ao longo do tempo, e em especial, os que a geografia me trouxe. Raquel, Marina, Mariana, Priscila, Alcione, Lílian, Henrique, Mateus, Amanda, e tantos e tantos outros, obrigada pela convivência, troca de experiências, carinho e principalmente, obrigada pelos risos. Como sobreviver a um mestrado sem vocês?

E o meu mais sincero agradecimento ao idealizador de tudo. Não poderia ter melhor orientador, que mistura orientação com amizade, respeito, admiração, divertimento, conhecimento, aprendizagem e amadurecimento. A Mariana de hoje deve muito (e quase tudo) ao orientador Fábio. Não tem como agradecer todas as oportunidades que você me ofereceu.

Passando para os agradecimentos formais, e mesmo assim também essenciais. Agradeço ao IGC (e aqui se insere não a instituição, mas os profissionais que a compõe) pela formação, à pós-graduação pela oportunidade, ao CNPq pelo apoio financeiro e à Marinha do Brasil pelo apoio logístico. Agradeço por fim, a Carol e a Amanda pela indispensável ajuda na petrografia e ao Fernando, ao Hélivio e ao Breno, técnicos dos laboratórios que tive permanência constante durante esses dois anos.

A photograph of a sunset over the ocean. The sky is filled with soft, golden light, and the clouds are illuminated from below, creating a dramatic effect. The horizon line is visible, with a large island or landmass in the distance. The water in the foreground is dark and textured with small waves.

*Deus ao mar perigo e abismo deu  
mas nele é que espelhou o céu*  
Fernando Pessoa

## RESUMO

Ambientes insulares sempre instigaram a imaginação humana e a curiosidade científica, talvez devido ao seu isolamento geográfico, por serem massas de terra circundadas por água; por seu caráter estratégico, servindo como abrigo, local de renovação de suprimentos e expansão de atividades marinhas; e por se configurarem como fortalezas naturais, capazes de isolar qualquer prisioneiro. É razoável pensar que todos os elementos e fenômenos geoambientais, como variações no nível do mar e das correntes oceânicas, variações climáticas, litológicas e geomorfológicas, associem-se ao referido isolamento geográfico e colonização biológica, na geração do forte grau de endemismo nas ilhas oceânicas, tanto biológico quanto o pedológico, constituindo verdadeiros ecossistemas endêmicos. Nesse contexto, inclui-se Trindade, ilha oceânica brasileira que para além dos fatores acima discutidos, também é cenário de outros processos estudados de maneira incipiente. Ilhas oceânicas representam importantes áreas de nidificação de diversas espécies de aves migratórias, cujos excrementos (guanós) são depositados sobre substratos diversos (rochas, sedimentos, solos). Essa interação entre a avifauna e os mais diversos substratos litológicos e pedológicos permite a gênese de materiais e feições muito diversificados, com aspectos morfológicos e geoquímicos singulares que seriam inexistentes sem a nidificação da avifauna. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo estudar os produtos gerados a partir das transformações provenientes da interação entre excrementos-substratos, tanto solos quanto rochas, na Ilha da Trindade. Como tais produtos advêm das interações processo - substrato, depois de identificados, estes tiveram sua gênese discutida através do estudo mineralógico, geoquímico e morfológico dos mesmos, considerando que serão esses atributos os indicadores de como tal interação tem transformado os substratos. Como forma de apresentar os resultados e discussões obtidos a partir dos objetivos propostos, o trabalho foi estruturado em dois capítulos. O primeiro capítulo trata da interação excrementos-solos de Trindade, considerando solos derivados dos três principais grupos de materiais existentes na Ilha: vulcanismo alcalino, vulcanismo básico e sedimentos bioclásticos carbonáticos. O segundo capítulo trata da interação excrementos-rocha, destacando litotipos vulcânicos alcalinos e básicos.

## ABSTRACT

Island environments always stir the human imagination and scientific curiosity, perhaps because of its geographic isolation, being land masses surrounded by water; by its strategic character, serving as a shelter, a place of renewal of supplies and expansion of marine activities; and being configured as natural fortresses, able to isolate any prisoner. It is reasonable to think that all the elements and geo-environmental phenomena such as variations in sea level and ocean currents, climate, lithological and geomorphological changes, geographic isolation and biological colonization, act together in the generation of the high degree of endemism on islands, both biological and the pedological, constituting true endemic ecosystems. In this context, there is Trindade, Brazilian oceanic island, that in addition to the factors discussed above, is also a place for other processes studied incipient. Oceanic islands are important nesting areas for several species of migratory birds, whose droppings (guano) are deposited on various substrates (rocks, sediments, soils). This interaction between the birds and the various lithological and pedological substrates allows the genesis of very diverse materials and features, with unique morphological and geochemical aspects that would not exist without the nesting of birds. In this sense, this work aims to study the products of the transformation from the interaction between excrement-substrates, as much soil as rocks, in the island of Trindade. They had their genesis discussed by mineralogical, geochemical and morphological analysis, considering that these attributes are indicators of how such interaction has transformed the substrates. In order to present the results and discussion obtained from the proposed objectives, the work was divided into two chapters. The first chapter deals with the Trindade excrement-soil process, considering soils derived from the three main groups of lithological materials on the island: alkaline volcanism, basic volcanism and bioclastic carbonate sediments. The second chapter deals with the excrement-rock process, with emphasis on alkaline and basic volcanic rock types.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Mapa de localização da Ilha de Trindade em relação à costa brasileira.....	6
<b>Figura 1.2</b> – Mapa das unidades litológicas da Ilha de Trindade.....	8
<b>Figura 1.3</b> – Domínios Geomorfológicos da Ilha de Trindade .....	10
<b>Figura 1.4</b> – Formações vegetais representativas da Ilha de Trindade .....	14
<b>CAPÍTULO 1 – SOLOS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL</b>	
<b>Figura 2.1</b> – Áreas selecionadas para o estudo. A) Praia das Tartarugas e B) Praia das Cabritas.....	33
<b>Figura 2.2</b> – Fotomicrografias das amostras associadas ao vulcanismo básico .....	42
<b>Figura 2.3</b> – Fotomicrografias das amostras associadas aos bioclastos carbonáticos.....	46
<b>Figura 2.4</b> – Fotomicrografias das amostras associadas ao vulcanismo alcalino .....	49
<b>Figura 2.5</b> – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos com a presença de cristais hexagonais de apatita numa matriz aluminossilicática. Amostra de kauli-gauteíte (CK1). .....	52
<b>Figura 2.6</b> – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (feições claras indicam a presença do elemento químico) destacando: A, B e C) presença de fragmentos de apatita de osso em distintos graus de degradação entre sedimentos bioclásticos e micromassa carbonática.....	53
<b>Figura 2.7</b> – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (feições claras indicam a presença do elemento químico) destacando: A e B)	

córtex de Ca-P reativo em fragmentos de escoria de vidro vulcânico em solos de rocha vulcânica básica; C) Ca-P iluvial em vesículas de fragmento de rocha vulcânica alcalina e D) micromassa impregnada por Ca-P em amostra de solo de rocha vulcânica alcalina. .... 55

## **CAPÍTULO 2 – ROCHAS AFETADAS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL**

**Figura 3.1** – Áreas selecionadas para o estudo da fosfatização dos solos. A) Praia das Tartarugas e B) Praia das Cabritas ..... 66

**Figura 3.2** – Fotomicrografia da amostra de Kali-gauteíte..... 70

**Figura 3.3** – Fotomicrografia da amostra de Fonolito porfirítico ..... 71

**Figura 3.4** – Fotomicrografia da amostra de Perquinito biotita horblendito ..... 72

**Figura 3.5** – Fotomicrografia da amostra de Perquinito biotita piroxênio..... 73

**Figura 3.6** – Fotomicrografias da amostra de Ankaratrito..... 74

**Figura 3.7** – Fotomicrografias das amostras de Fonolito Stricto Senso ..... 76

**Figura 3.8** – Aspectos macro e microscópico das feições ornitogênicas em rochas ..... 79

**Figura 3.9** – Detalhamentos de algumas feições ornitogênicas observadas em rochas ..... 80

**Figura 3.10** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (as cores indicam a presença do elemento químico) destacando: A e B) crosta ornitogênica; C) feição de preenchimento de fratura por solução ornitogênica; D) inflorescência..... 81

**Figura 3.11** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (as cores indicam a presença do elemento químico) destacando: A) crosta (parte inferior da imagem) e preenchimento das fraturas de um cristal de sanidina; B) e C) contato entre a crosta, a matriz e um fenocristal de sanidina..... 82

## **LISTA DE QUADROS**

### **CAPÍTULO 1 – SOLOS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL**

**Quadro 2.1** – Relação de amostras coletadas..... 34

### **CAPÍTULO 2 – ROCHAS AFETADAS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL**

**Quadro 3.1** – Rochas identificadas por unidade geológica ..... 69

**Quadro 3.2** – Feições identificadas nas rochas de Trindade..... 84

## **LISTA DE TABELAS**

### **CAPÍTULO 1 – SOLOS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL**

**Tabela 2.1** – Análise textural das amostras analisadas. .... 37

**Tabela 2.2** – Atributos químicos dos perfis analisados ..... 38

**Tabela 2.3** – Teores químicos totais obtidos por FRX e mineralogia obtida por DRX . 39

# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	1
1.1 Por que estudar ilhas oceânicas? .....	1
1.2 As especificidades da Ilha de Trindade .....	4
1.3 Transformações de substratos associadas à atividade biológica .....	16
1.4 Objetivos .....	20
1.5 Referências Bibliográficas .....	22
CAPÍTULO 1 – SOLOS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL .....	29
2.1 Introdução .....	29
2.2 Materiais e métodos .....	30
2.2.1 Área de estudo, coleta e preparo das amostras .....	30
2.2.2 Análises físicas, químicas e mineralógicas .....	34
2.2.3 Análises micromorfológicas e petrográficas em seções finas .....	36
2.3 Resultados: caracterização geral dos materiais investigados .....	36
2.3.1 Solos associados a derrames vulcânicos de natureza básica .....	39
2.3.2 Solos associados a sedimentos bioclásticos carbonáticos .....	43
2.3.3 Solos associados a derrames vulcânicos de natureza alcalina .....	47
2.4 Discussão .....	50
2.5 Considerações Finais .....	55
2.6 Referências Bibliográficas .....	57
CAPÍTULO 2 – ROCHAS AFETADAS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL .....	63
3.1 Introdução .....	63
3.2 Materiais e métodos .....	65
3.2.1 Área de estudo, coleta e preparo de amostras .....	65
3.2.2 Estudo petrográfico .....	67
3.3 Resultados .....	68
3.3.1 Petrografia das rochas coletadas .....	68
3.3.1.1 Kali-gauteíte .....	68
3.3.1.2 Fonolito porfirítico .....	70
3.3.1.3 Perquinito biotita horblendito .....	71

<b>3.3.1.4 Perquinito biotita piroxênio .....</b>	<b>72</b>
<b>3.3.1.5 Ankartrito.....</b>	<b>73</b>
<b>3.3.1.6 Fonolitos Stricto Sensu .....</b>	<b>74</b>
<b>3.3.2 Petrografia das feições ornitogênicas.....</b>	<b>76</b>
<b>3.4 Existe um controle litológico na formação de feições ornitogênicas? .....</b>	<b>84</b>
<b>3.5 Existe uma relação genética entre as feições? .....</b>	<b>85</b>
<b>3.6 Considerações Finais .....</b>	<b>88</b>
<b>3.7 Referências Bibliográficas .....</b>	<b>89</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Por que estudar ilhas oceânicas?

Ambientes insulares sempre instigaram a imaginação humana e a curiosidade científica, talvez devido ao seu isolamento geográfico, por serem massas de terra circundadas por água; por seu caráter estratégico, servindo como abrigo, local de renovação de suprimentos e expansão de atividades marinhas; e por configurarem como fortalezas naturais, capazes de isolar qualquer prisioneiro. Fato é que ao longo da história diversas ilhas representaram o berço de vários contos fantásticos e utopias sociais (DUARTE & HORTA, 2012). Conceitualmente são definidas como porções terrestres circundadas por água, o que reduz a acessibilidade e conexões com porções continentais ou outras ilhas, dificultando e até privando sua biota de relações ecológicas com outros ambientes (WALTER, 2004). Em se tratando das ilhas oceânicas, tais interesses se tornam mais acentuados, sobretudo aqueles de caráter científico, tendo em vista que estas possuem sua sustentação em assoalho oceânico e com morfogênese associada a um conjunto de processos tectônicos, vulcânicos, sedimentares e biológicos (OLIVEIRA, 2008).

O isolamento geográfico é um fator de relevância no âmbito das pesquisas ambientais em ilhas oceânicas. Por representarem massas terrestres com extensões inferiores às continentais, as minúcias das relações ecológicas tornam-se menos complexas e mais facilmente identificadas. Isso ocorre porque a relação espécie-área, uma das premissas básicas da ecologia, atua no sentido da menor diversificação das espécies em uma relação proporcional à área. Isto é, quanto menor a área, menor será o número de espécies vegetais e faunísticas colonizadoras (GOTELLI, 2009). Nessa perspectiva, ilhas oceânicas se adequam perfeitamente aos princípios do modelo de equilíbrio da biogeografia de ilhas, popularizado por Robert H. MacArthur e Edward O. Wilson em 1967<sup>1</sup>, tornando-as objeto de estudo para a evolução, desenvolvimento, especiação e endemismo da vida no planeta.

---

<sup>1</sup> MACARTHUR, R. H.; WILSON, E. O. The theory of island biogeography. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. 203p. 1967.

Os ecossistemas insulares, principalmente àqueles isolados por milhas e milhas de qualquer massa continental, possuem limites geográficos definidos, sendo, por isso, autônomos. Contudo, há uma nítida interface entre os ambientes terrestres das ilhas e as áreas marinhas adjacentes, ocorrendo uma relação de interdependência e conectividade notória entre ambos. A ciclagem de nutrientes, por exemplo, tem papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos, a partir dos quais nutrientes minerais são transformados, transportados e disponibilizados aos organismos, possibilitando o desenvolvimento da biodiversidade, tanto terrestre quanto marinha.

Os dados encontrados por Myers *et al.* (2000) e Roberts *et al.* (2002) destacam que em 8 dos 10 *hotspots*<sup>2</sup> da biodiversidade marinha e 14 dos 18 centros de endemismo são adjacentes aos *hotspots* de biodiversidade terrestre. Assim, um terço dos *hotspots* da biodiversidade abrangem ilhas e mais da metade da biodiversidade marinha tropical encontra-se nas proximidades de ilhas oceânicas (MARIN *et al.*, 2004). Essa biodiversidade apresenta forte grau de endemismo, mas envolve também muitas espécies ameaçadas de extinção. Como apontado por Fonseca *et al.* (2006), mesmo representando somente 5% das terras emersas do planeta, um terço de todas as espécies de aves, mamíferos e anfíbios ameaçados estão em ilhas. Tal vulnerabilidade é explicada pela própria história evolutiva das espécies. As ilhas podem ser colonizadas por dispersão e imigração, ou por evolução e especiação *in situ*. Em ambos os casos, os ambientes insulares oferecem condições geográficas muito restritas, principalmente devido aos próprios processos formadores do ambiente. Processos vulcânicos, condições climáticas diversas, evolução morfodinâmica peculiar são alguns dos fatores que propiciam a diversidade de habitats e contribuem na geração de populações de fauna e flora muito especializadas e endêmicas (MARIN *et al.*, 2004). Por evoluírem confinadas com populações pequenas, as espécies se desenvolvem praticamente livres de competição por recursos e com menor variabilidade genética, o que as tornam sensíveis a invasões de espécies exóticas. Hoje a biodiversidade das ilhas está

---

<sup>2</sup> Proposto pelo próprio Myers em 1988, o termo hotspot se refere a uma área prioritária para conservação, conjugando dois elementos: elevado nível de biodiversidade e alto grau de ameaça de extinção. Tais elementos associados selecionam os hotspots do planeta que necessitam de ações conservacionistas mais urgentes.

ameaçada justamente devido à modificação ou completa destruição dos habitats e à introdução de espécies exóticas (WALTER, 2004; SERAFINE *et al.*, 2010).

Ambientes insulares também tiveram sua importância ao elucidar o caráter finito dos recursos naturais. Durante séculos agentes coloniais europeus presenciaram as consequências da exploração voraz destes recursos em ilhas, ocasionando não somente a destruição da fauna e flora, como também desencadeando processos erosivos e dessecação de cursos de água, em um período relativamente curto. A maioria das ilhas se enquadra neste cenário, e a atual preocupação dos estudos é a compreensão dos fatores e elementos responsáveis pela espacialidade dos seres vivos, visando não só a reconstituição evolutiva, mas principalmente subsidiar o planejamento voltado para a recuperação destas áreas.

No caso brasileiro, a conjuntura geopolítica e econômica garantiu nas três últimas décadas maior incentivo às pesquisas científicas direcionadas ao território marítimo nacional, incluindo os cinco arquipélagos oceânicos: Trindade e Martin Vaz, Abrolhos, Fernando de Noronha, Atol das Rocas e São Pedro e São Paulo. Esforços do Governo Federal, da Marinha brasileira e de órgãos fomentadores da pesquisa foram unidos para a criação de programas de incentivo às pesquisas em ilhas, como o PROTRINDADE, para Trindade e Martins Vaz, e o PROARQUIPÉLAGO, para São Pedro e São Paulo. Este território abrange uma área de aproximados 3,6 milhões de km<sup>2</sup>, característica que em conjunto com a rica biodiversidade lhe assegura a alcunha de Amazônia Azul.

Seguindo os preceitos da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, a extensão e os limites das zonas marítimas no Brasil estão instituídos pela Lei 8.617/93, incluindo o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a plataforma continental. Tal lei assegura ao Brasil o direito de soberania sobre o uso, conservação e gestão dos recursos naturais dessa faixa do Oceano Atlântico, sejam eles bióticos ou abióticos, referentes às águas e ao subsolo marinho. Desde 2004 o governo brasileiro tem proposta enviada a ONU de ampliação de sua plataforma continental, afirmando que as

200 milhas estabelecidas não contemplam toda a verdadeira extensão física da plataforma (MARTINS, 2010; SILVA, 2013). Nessa perspectiva, não apenas a biodiversidade marinha é foco nas pesquisas científicas, mas também estudos de reconhecimento de recursos minerais, dados geofísicos, batimétricos e magnéticos, objetivando o estabelecimento dos limites e propriedades da plataforma (SILVA, 2013). O potencial energético de exploração dos recursos minerais e fósseis, em especial após a descoberta da camada pré-sal, agrega ainda mais importância econômica ao solo e subsolo do mar territorial (MARTINS, 2010). Destaca-se, também, o caráter geopolítico do incentivo às pesquisas como esforço de garantir a ocupação das ilhas oceânicas, assegurando a soberania nacional na posse destes, além de ampliar o controle de navegação da parte oeste do Atlântico Sul (ZARINATO, 2012).

## 1.2 As especificidades da Ilha de Trindade

A Ilha da Trindade, localizada no Atlântico Sul, constitui a área de estudo deste trabalho e se insere no contexto previamente abordado. A Ilha faz parte de uma extensa cadeia vulcânica submarina de orientação leste-oeste, denominada Vitória-Trindade, constituída por uma série linear de guyots<sup>3</sup>. Almeida (1961; 1962) afirma que durante o Plioceno tal cadeia constituía um arquipélago de vulcões ativos, e no Quaternário, com vulcanismo quase extinto, tais ilhas foram submetidas às ações erosivas tão agressivas que o nível do mar acabou por cobri-las por completo. A atividade tectono-magmática cenozóica da Cadeia Vitória-Trindade ocorreu em falhas reativadas ao longo da Zona de Fraturas Vitória-Trindade. A cadeia teria se originado por meio da migração da Placa Sul-Americana sobre o *Hot Spot*<sup>4</sup> de Trindade. A zona de fratura, nesse caso, teria atuado como um conduto, canalizando o magmatismo da pluma (FERRARI & RICCOMINI, 1999). O alinhamento das rochas alcalinas de Poços de Caldas à Cabo Frio sugere a atuação de um *hot spot* ao longo da

---

<sup>3</sup> Montes vulcânicos submersos.

<sup>4</sup> Tais hotspots, diferentemente dos anteriores, estão relacionados aos pontos fixos no globo, que quando ativos ascendem jatos de material magmático. A posição que a placa ocupa sobre o ponto quente é representada por um vulcão ativo, que se torna inativo com a movimentação da placa tectônica. O movimento da placa origina, dessa forma, um alinhamento de vulcões (POMEROL *et al.*, 2013).

movimentação da Placa Sul-Americana, e muitos pesquisadores consideram que seja o mesmo *hot spot* de Trindade (MIZUSAKI *et al.* 2002). Considerando que o vulcanismo na ilha esteve ativo até o Holoceno, a existência de microtremores e de anomalias da velocidade sísmica na ilha suscita o questionamento se o vulcanismo em Trindade está extinto ou em período de quiescência (ALMEIDA, 2006).

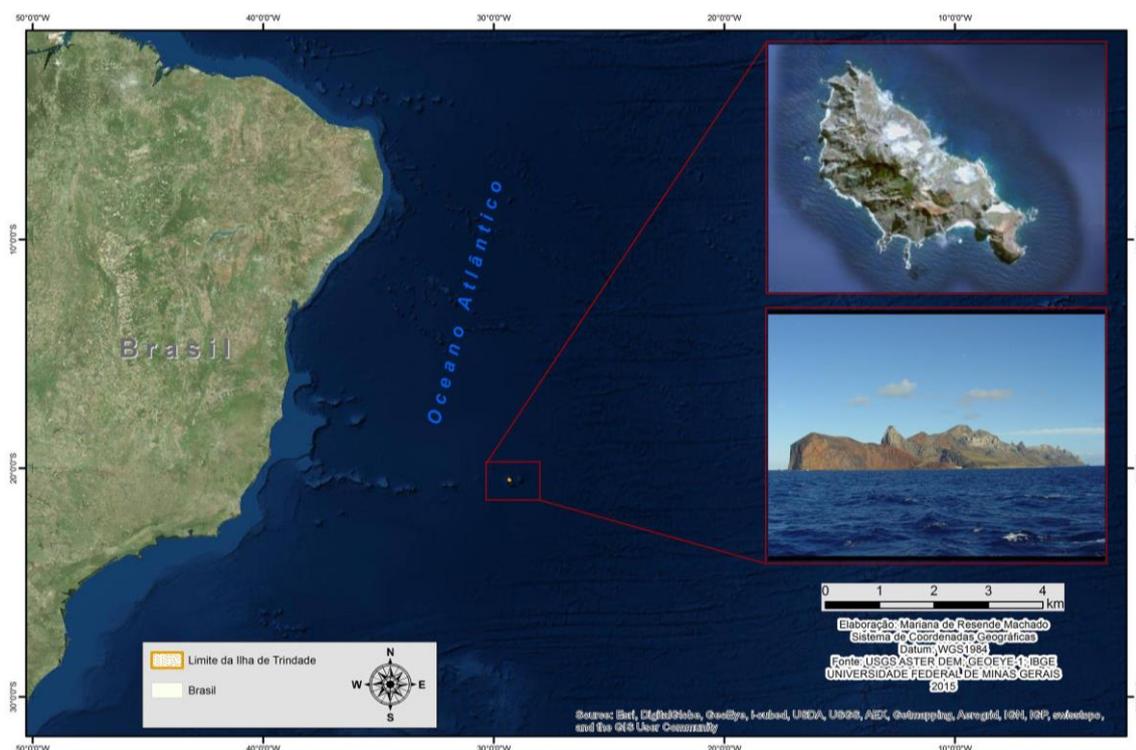
Estando a 1.140 km de distância<sup>5</sup> da costa brasileira (RIBEIRO, 1951) em direção à África, Trindade se localiza na latitude 20°30' S e longitude 29°19' W (**Figura 1.1**) e possui 13,5 km<sup>2</sup> de área (ALMEIDA, 1962). Martin Vaz está a cerca de 48 km a leste, sendo um arquipélago de três rochedos – Ilha do Norte, Ilhota Agulha e Ilha do Sol – além da própria Martin Vaz (FERRARI & RICCOMINI, 1999). Trindade e Martin Vaz são domínios da Marinha Brasileira administradas pelo 1º Distrito Naval, sendo mantido desde 1957 o Posto Oceanográfico da Ilha de Trindade (POIT). Criado como parte do Programa de Participação do Brasil no Ano Geofísico Internacional, a ocupação de integrantes das forças militares no POIT é permanente, com um contingente de aproximadas 30 pessoas, variando com a presença ou não de pesquisadores.

Trindade como ilha emersa tem sua gênese no Cenozoico, há aproximados três milhões de anos (ALMEIDA, 1962). Está associada a derrames e intrusões sódico-alcálicas, marcadamente sub saturadas em sílica, além de piroclastos diversos. Tais derrames estiveram ativos durante todo o Quaternário até o início do Holoceno (ALMEIDA, 2006). Dessa forma, a exceção de alguns depósitos litorâneos e fluvio-colúviais, recifes de algas, dunas e praias, toda a ilha é formada por material vulcânico extrusivo e/ou subextrusivo (ALMEIDA, 1961; 1962; 2002; 2006). Ademais, encontra-se fulguritos na areia calcária das dunas da Praia das Tartarugas, concreções tubulares criadas pela fusão dos grãos de areia devido ao impacto de raios (ALVES, 1998).

---

<sup>5</sup> Não há um consenso na literatura acerca das variáveis dimensionais da ilha, como a distância em quilômetros da costa brasileira, encontrando-se: 1000 km (FERRARI & RICCOMINI, 1999); 1100 km (CLEMENTE, 2006); 1140 (RIBEIRO, 1951; ALMEIDA, 1962); 1160 km (SERAFINI *et al.*, 2010); 1170 km (ALMEIDA, 2006). Neste trabalho optou-se por utilizar 1140 encontrado por Ribeiro (1951) na expedição João Alberto, em que o autor atribuía essa divergência às técnicas e aparelhagens de medição, além dos pontos de referência utilizados. 1140 km então é a distância entre a costa do Espírito Santo (na localidade do Porto da Fruta) até a ilha.

**Figura 1.1** – Mapa de localização da Ilha de Trindade em relação à costa brasileira



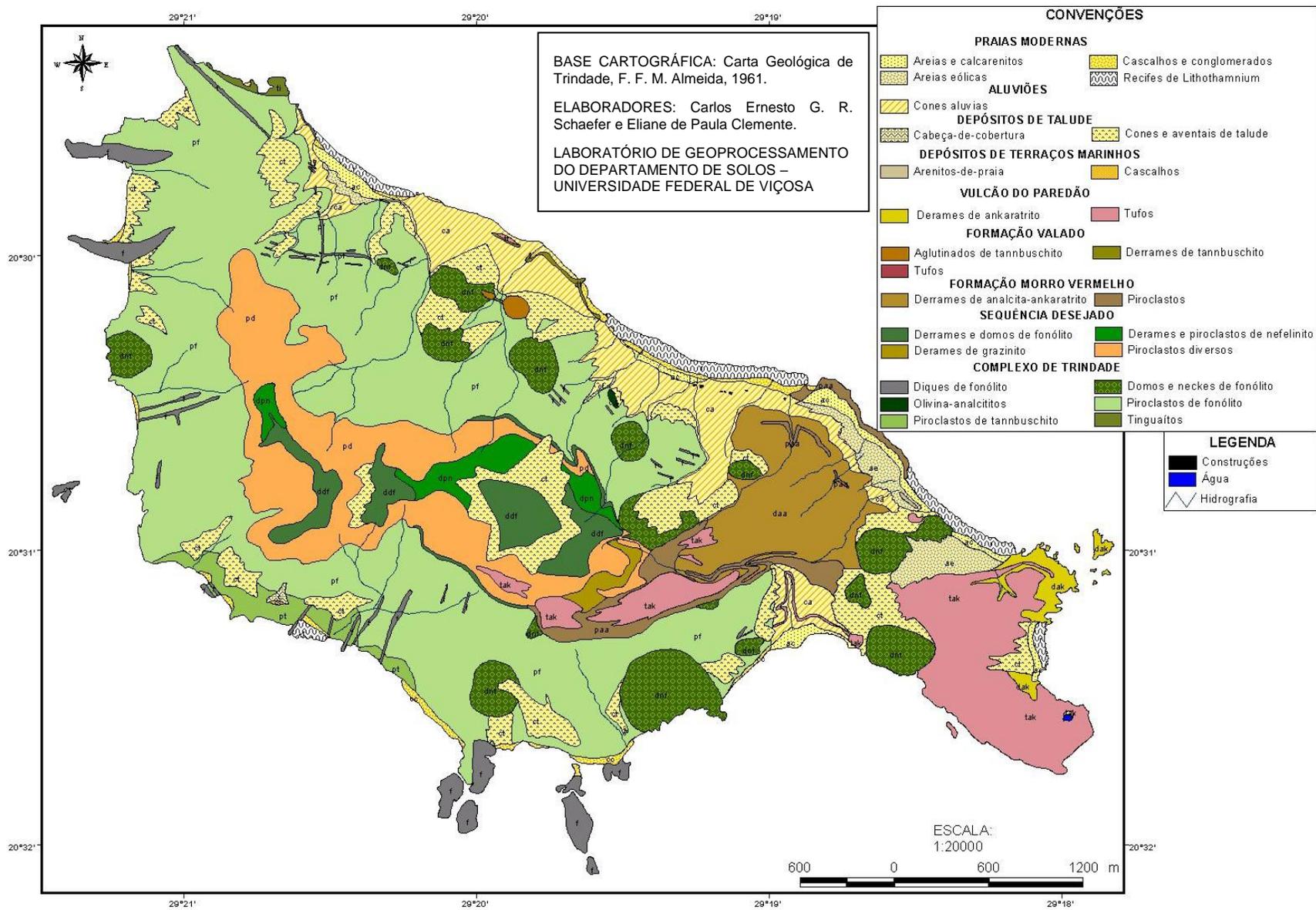
Almeida (1961) reconheceu cinco formações vulcânicas em Trindade (**Figura 1.2**). O maior volume exposto na ilha e também a mais antiga manifestação vulcânica acima no nível do mar, onde estão estabelecidas as demais formações, é o Complexo Trindade, cuja constituição é uma associação heterogênea de corpos piroclásticos e eruptivos, na maioria intrusivos, derivados principalmente de vulcanismo fonolítico. Presente nas vertentes de praticamente toda a ilha, o Complexo é penetrado por intrusões de fonólitos, traquiandesitos e nefelinitos. Almeida (1962) contabilizou um total de 16 grandes intrusões fonolíticas que se sobressaem no relevo, representando domos, necks e diques expostos pela erosão. As rochas mais abundantes desta formação são os fonólitos, que geralmente estão associados a tufos e brechas de mesma composição. Por meio de datações de K-Ar, Cordani (1970) verificou que as rochas do Complexo possuem idades entre 3,7 e 2,3 Ma, sendo as rochas subvulcânicas (domos, diques e necks) originaram-se no período entre 2,9 e 2,3 Ma. Os diques ultrabásicos, que muito provavelmente

alimentaram os derrames mais jovens, apresentam idades entre 3,7 e 1,1 Ma (ULBRICH *et al.*, 2004).

O segundo episódio vulcânico, Sequência Desejado, refere-se a derrames de fonólitos, tefritos fonolíticos (grazinitos) e nefelinitos com intercalações de camadas de piroclastos de composição equivalente. Os derrames ocorreram na parte mais central da ilha. Tal formação está exposta principalmente nos três picos que nomeiam Trindade: Desejado, Trindade e São Bonifácio. A idade encontrada por Cordani (1970), entre 2,63 e 1,50 Ma, indica discordância erosiva com o Complexo (ALMEIDA, 2006).

Almeida (2006) identifica um hiato no vulcanismo, que durou cerca de 1,3 Ma, com retomada dos processos eruptivos em meados do Pleistoceno através da emissão de derrames ultrabásicos alcalinos correspondentes aos três episódios vulcânicos mais recentes – Formações Morro Vermelho, Valado e Vulcão do Paredão. A Formação Morro Vermelho se deu a partir de uma única e continuada manifestação vulcânica com certo caráter explosivo, de derrames de magma melanefelínico (ankaratrítico) e depósitos piroclásticos, recorrentes na porção oriental da ilha. A Formação Valado, composta por derrames de natureza olivina melanefelínica (tannbuschitos) e depósitos piroclásticos com camadas de tufo, ocorre em faixa mais restrita e estreita do norte da ilha (Almeida, 1962). Por fim, a Formação Vulcão do Paredão, episódio vulcânico mais recente, representado por parte preservada de uma cratera de edifício vulcânico, único existente no Brasil, localizado na extremidade oriental da ilha e em contínuo desmonte devido à erosão marinha. O cone vulcânico é formado por materiais piroclásticos (tufos lapilíticos com blocos e bombas, tufos-brechas e aglomerados brechóides) de composição ankaratrítica e intercalações de lavas ultrabásicas (ALMEIDA, 1962; 2006).

Figura 1.2 – Mapa das unidades litológicas da Ilha de Trindade

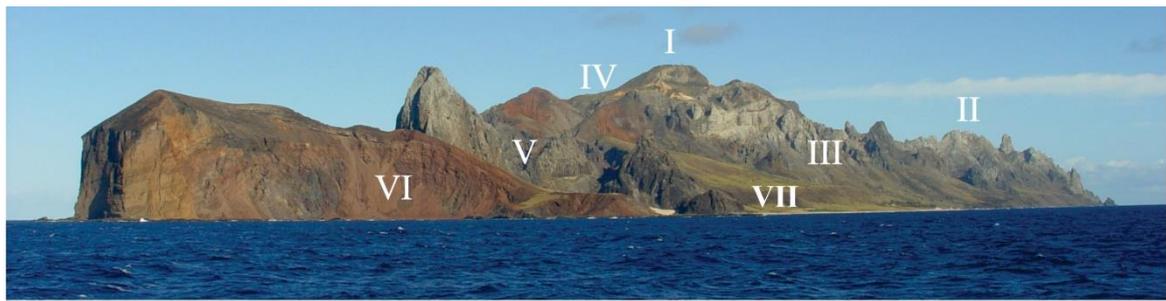


Fonte: CLEMENTE, 2006, p. 10. Adaptado de Almeida (1961).

Exposto à atuação de agentes intempéricos, o relevo de Trindade é extremamente acidentado e dissecado, com escarpas íngremes, penhascos, vales profundos e platôs estruturais, com pontos culminantes alcançando cerca de 620 m de altitude. Dos picos centrais nascem todos os cursos d'água, apesar do sistema de drenagem carecer de estudos que quantifiquem sua vazão (ALVES, 1998; ALMEIDA, 2002).

O conjunto das formas de relevo pode ser agrupado em (**Figura 1.3**): I) Platô Central; II) Domos e Pináculos; III) Encostas Vulcânicas; IV) Platô Ankaratrítico; V) Necks e Domos Fonolíticos; VI) Vulcão do Paredão; VII) Domínio Litorâneo (ALMEIDA, 1961; SCHAEFER & OLIVEIRA, 2015). O primeiro engloba as áreas de maiores elevações da ilha, em que se originam os principais cursos d'água. Assentados sob rochas da Sequência Desejado, o Platô Central ergue-se acima de 350 metros, e destacam-se no centro da ilha os picos do Desejado (620 m), Trindade (590 m), São Bonifácio (570 m) entre outros que correspondem às formas do domínio dos Domos e Pináculos, todos separados por vales profundos. As Encostas Vulcânicas, por sua vez, compõem-se por superfícies rochosas abruptas que decaem até o mar, com acumulações de blocos de diferentes tamanhos, soltos por desagregação mecânica, formando depósitos de talude que recobrem as encostas dos morros e picos. O Platô Ankaratrítico localiza-se na parte oriental da ilha, com altitude máxima de 515 metros, e relevo assentado sob a Formação Morro Vermelho, constituindo-se em um platô estrutural bastante erodido. Os Necks e Domos fonolíticos, por sua vez marcavam os limites à leste da ilha antes do último episódio vulcânico, o característico Vulcão do Paredão. Como anteriormente mencionado, é uma das feições geomorfológicas mais emblemáticas da ilha, constituindo-se do que restou da cratera de um vulcão. Paredões de tufos a sul do morro perfazem a superfície do cone. Os declives em geral configuram-se por escarpas abruptas. Por fim, o Domínio Litorâneo é constituído por doze praias, com costões laterais formando grandes saliências no contorno da ilha. Destaca-se a ocorrência de patamares marinhos com seixos cimentados com carbonatos e enseadas com bancos de corais, além de se encontrar na Praia das Tartarugas a formação de pequenas dunas carbonáticas. (ALMEIDA, 1961; CASTRO & ANTONELLO, 2006, CLEMENTE, 2006).

Figura 1.3 – Domínios Geomorfológicos da Ilha de Trindade



### Imagens dos Domínios Geomorfológicos



Adaptado de Schaefer & Oliveira (2015).

A rede de drenagem caracteriza-se por caráter torrencial de competência mediana, com as vazões reduzidas na estação seca. É interessante destacar que os córregos de Trindade são autossuficientes no abastecimento da ilha, sendo a única ilha brasileira com água doce disponível (ALVES, 1998; CASTRO, 2009). O clima da ilha é caracterizado como do tipo oceânico tropical, mas com regime de precipitação característico de semi-úmido com tendências a semi-árido, com precipitação média anual de 923 mm. A temperatura média anual é 25,2°C, sendo o mês de fevereiro o mais quente, contabilizando máxima de 30°C e mínima de 17°C em agosto (ALVES, 1998). Vale destacar que a face sudoeste é notavelmente mais úmida que a nordeste, principalmente devido à barreira orográfica representada pelas elevações da própria ilha.

Com o final dos episódios vulcânicos, ocorreram as manifestações das primeiras colonizações vegetais, que ao longo do tempo passaram a recobrir as encostas com extensos bosques tropicais. Acredita-se que os ancestrais das espécies originais que cobriam a ilha chegaram através de mecanismos naturais de dispersão – transporte pela água em correntes marinhas, por vento, aves, entre outros – os quais também foram responsáveis pela seleção dessas espécies. Além dos propágulos serem submetidos a *stress* durante o transporte (principalmente àqueles transportados pelas águas oceânicas saturadas por sal), é necessário que encontrem em terra condições ambientais de clima e solo condizentes com sua sobrevivência. Não há afinidade florística entre as ilhas oceânicas brasileiras e Trindade, embora alguns autores defendam que várias espécies (em especial as pteridófitas) possuem elementos florísticos tipicamente sul-americanos (ALVES, 1998; 2006).

Os cinco séculos de ocupação humana a qual a ilha foi submetida resultaram na forte modificação vegetal e faunística (ALVES, 1998). Desde sua descoberta até o século XX, foram introduzidas espécies exóticas, como cabras, carneiros, porcos, galinhas d'angola, gatos doméstico, camundongos e insetos parasitas (BARTH, 1958; ALVES, 1998;), responsáveis pelo desequilíbrio das relações ecossistêmicas e pela degradação ambiental da paisagem. Dessa forma, a flora original de Trindade compunha-se de espécies que ocorriam na Ilha antes da chegada dos seus descobridores, estando hoje praticamente extinta.

A descoberta da ilha em 1501 é atribuída a João da Nova, espanhol que navegava a serviço de Portugal, não havendo nenhum registro de ocupação pré-histórica. Dos relatos oficiais, apenas a partir de 1700 a Ilha atraiu a atenção de Portugal e da Inglaterra. É também a partir desta época que se tem registro das primeiras ocupações e introdução de espécies exóticas (RIBEIRO, 1951; BARTH, 1958).

Antigos relatórios de naturalistas e pesquisadores que participaram de expedições à Ilha, como os de Edmundo Halley e James Cook, descrevem a abundante flora tropical de Trindade, sendo densamente ocupada por grandes árvores de madeira vermelha, em especial nas encostas voltadas para o nordeste (BARTH, 1958). Na época acreditava-se ser Pau-Brasil, tratando-se na verdade da *Colubrina glandulosa*, ou Pau Tucano, como é comumente conhecida. Já as encostas voltadas para sudoeste ainda permanecem recobertas de variadas espécies de pteridófitas, que na descrição de Ralph Copeland, o emaranhado de troncos rastejantes era tal que dificultava a passagem (BARTH, 1958).

No final do século XVIII, Trindade recebeu seu maior contingente de habitantes. Trata-se de um grupo de 150 pessoas, que durante algumas décadas tentaram estabelecer produção agrícola de subsistência, sendo um período de forte modificação e introdução de espécies faunísticas e florísticas exóticas (RIBEIRO, 1951). Na década de 50 do século XX já era reconhecido o papel das cabras e carneiros na devastação de grande parte da vegetação. Barth (1958) relata que a população destes chegava a expressivos 300 e 200 indivíduos, respectivamente, os quais se espalhavam indiscriminadamente tanto nos topos dos picos mais altos quanto nas proximidades das praias. À exceção das samambaias, tais herbívoros alimentavam-se de todos os componentes da vegetação, inclusive os troncos, principalmente das *Columbrinas*, sendo comum encontrar seus troncos mortos nas ravinas e nos topos da ilha. Ademais, vale ressaltar que tal contingente populacional exercia peso considerável nas vegetações arbustivas e rasteiras, degradando-as através do pisoteio.

As práticas de recuperação vegetal em Trindade constituem empreendimentos realizados desde a década de 1990. Contudo, muitas das intervenções não geraram resultados satisfatórios porque as cabras, que se tornaram selvagens com o passar do tempo, ainda representavam uma ameaça. Assim, a partir de uma operação envolvendo a Marinha, em 2005 todas as cabras que habitavam Trindade foram exterminadas, não restando nenhum dos animais domésticos citados anteriormente.

Segundo Alves (1998), atualmente são distinguidas na Ilha as seguintes formações vegetais terrestres (**Figura 1.4**): i) Matas constituídas da floresta nebulosa de *Rapanea guyanensis*; floresta nebulosa de *Cyathea delgadii de Trindade* (floresta de samambaias gigantes); moita de *Dodonaea viscosa*. ii) Campos constituídos de campo herbáceo de *Pityrogramma calomelanos* e campo herbáceo de *Cyperus atlanticus* e *Bulbostylis nesiotis*, além de outras formações de musgos, líquens, algas e alguns exemplares de árvores frutíferas exóticas, como castanheiras. Da lista de 124 espécies de plantas vasculares encontradas em Trindade realizada por Alves (1998), incluindo aquelas trazidas e cultivadas pelo homem, 11 são espécies endêmicas.

Com relação à fauna, Trindade é considerada pobre em espécies de vertebrados, a exceção das aves marinhas que residem ou utilizam como área de migração e nidificação e o caranguejo terrestre *Gecarcinus lagostoma*, que é encontrado em abundância. A distância de Trindade em relação ao continente é o principal limitante para dispersão e colonização de mamíferos, répteis e anfíbios. Com relação à biodiversidade faunística marinha, não há na literatura registros sobre espécies exóticas invasoras. Apesar dos 6,1% de endemismo entre as espécies de peixes, a ictiofauna de Trindade permanece como a menos conhecida entre as ilhas oceânicas brasileiras (SERAFINI *et al.*, 2010). O ambiente costeiro da ilha possui importância fundamental para a reprodução da tartaruga verde, *Chelonia mydas*, espécie em extinção e cujo número significativo de desova no local é responsável por nomear a Praia das Tartarugas (BARTH, 1958; ALVES, 1998).

**Figura 1.4** – Formações vegetais representativas da Ilha de Trindade



*Cyathea delgadii*



*Cyperus atlanticus*



*Columbrina glandulosa*



*Bulbostylis nesiotis*



*Ipomea pés-caprae*



*Pityrogramma calomelanos*

Sobre os solos, os elementos e fenômenos geoambientais (variações no nível do mar e das correntes oceânicas, variações climáticas, litológicas e geomorfológicas) associam-se ao isolamento geográfico e colonização biológica na sua formação e evolução, ocasionando, inclusive, a formação de

solos considerados endêmicos (GUO *et al.*, 2003; BOCKHEIM, 2005; CLEMENTE *et al.*, 2006; OLIVEIRA, 2008; CLEMENTE *et al.*, 2009; SÁ, 2010; CLEMENTE *et al.*, 2011).

O primeiro autor a usar o termo “endemismo” para solos foi Guo *et al.* (2003) ao tratar da pedodiversidade nos Estados Unidos. Pouco depois o tema foi mais amplamente desenvolvido por Bockheim (2005). Para estes autores, o endemismo se aplica aos solos a partir dos preceitos da teoria dos fatores e processos de formação, desenvolvido por Jenny (1941). A combinação de fatores em condições únicas ou atípicas resultará na formação de solos também únicos. Quando essas mesmas condições estiverem presentes em áreas diferentes, o resultado da pedogênese será a formação de solos com características muito semelhantes entre si. Para tanto, o forte endemismo no solo está associado com: materiais de origem incomuns, condições climáticas extremas, influência da topografia local e colonização biológica. Em Trindade, os materiais de origem incomuns (rochas vulcânicas mais jovens do território brasileiro) são potencialmente produtores de solos com características muito específicas e peculiares no contexto intertropical brasileiro, adquirindo assim o caráter de forte endemismo pedológico, referido por Bockheim (2005) como endemismo edáfico.

Apesar de o endemismo pedológico ser forte na ilha, os processos morfogenéticos são mais intensos que os pedogenéticos, resultando no predomínio de afloramentos rochosos e depósitos de tálus na base das vertentes. Por conseguinte, a cobertura pedológica se caracteriza por ser pouco espessa, predominando associações entre afloramentos e Neossolos Litólicos eutróficos fragmentários e Cambissolos Háplicos Ta eutróficos (Clemente *et al.*, 2006). No mapeamento pedológico realizado por Sá (2010), os Neossolos correspondiam à classe de maior predominância, recobrando 55% do território, sendo encontrado tanto nas áreas mais baixas situadas na face mais seca, quanto nos afloramentos rochosos e nas áreas deposicionais. Já os Cambissolos ocupam cerca de 30% de Trindade, preferencialmente nas porções medianas e áreas que permitam a atuação intempérica. Vale destacar que com a retirada da cobertura vegetal, os solos existentes anteriormente e já susceptíveis aos processos erosivos tornaram-se ainda mais frágeis,

resultando na esculturação de feições erosivas na paisagem e consequente perda de solo.

### **1.3 Transformações de substratos associadas à atividade biológica**

A colonização biológica dos substratos desempenha o papel de agente desencadeador e intensificador tanto de intemperismo físico quanto químico, sendo responsável por um conjunto de processos adjetivados de bio físicos e/ou químicos. Líquens, fungos, microrganismos e vegetais produzem ácidos através de seu metabolismo, com capacidade de decompor diretamente as rochas, transformando minerais primários em secundários e liberando íons em suas formas solúveis. Além disso, plantas vasculares, através do crescimento das raízes, possuem a capacidade de penetrar fissuras nas rochas forçando o seu rompimento e quebra (POMEROL et al., 2013).

Em se tratando da relação entre a atividade biológica e a cobertura pedológica, seu papel é tão fundamental que os organismos são considerados agentes de formação, evolução e dinâmica dos solos (JENNY, 1941). Além do próprio intemperismo físico e biogeoquímico, os organismos influenciam a síntese de húmus, a homogeneização dos perfis, a ciclagem de nutrientes, a bioturbação e movimentação dos constituintes, a biomineralização, a formação de microagregados, etc. Alguns estudos advogam, inclusive, que a pedodiversidade no planeta estaria estreitamente ligada ao surgimento da vida (AZEVEDO et al., 2007).

Ainda hoje a eficiência do intemperismo biogeoquímico é discutida em estudos em que a transição escalar é abordada, passando de escalas locais a regionais, principalmente devido à falta de análises com resultados quantitativos (SVERDRUP, 2009). A comunidade científica, contudo, reconhece que a eficiência da contribuição dos processos biológicos na taxa de intemperismo é dependente das condições ambientais locais. Em regiões submetidas a condições ambientais extremas ou de condições ecológicas específicas, a contribuição biológica é superior, já que a atuação de outros

processos é de alguma forma limitada – pela falta de água, por exemplo (VILES, 1995).

Transformações biogeoquímicas e morfológicas associadas à atividade biológica são notoriamente percebidas em Ilhas oceânicas e regiões polares. Estes dois ambientes são importantes áreas de nidificação da avifauna, representada principalmente por aves marinhas migratórias, cujos excrementos (guanós) são depositados sobre substratos diversos (rochas, sedimentos e solos). A interação de tais excrementos com o substrato estimula uma série de processos geoquímicos, que tem como produto a alteração e neoformação mineralógica, a constituição de feições nas rochas, o desencadeamento de processos pedogenéticos e o *input* de diversos elementos químicos ao ambiente (TATUR, 1989).

Fluxos de energia e matéria entre os hábitat limítrofes continente-oceano exercem profundos efeitos (direta e indiretamente) na dinâmica do sistema receptor. Comumente, o sentido continente-oceano é fluxo de transporte mais estudado. Entretanto, a atividade da avifauna é responsável por realizar o transporte de nutrientes e matéria no contra fluxo, no sentido oceano-continente (ANDERSON & POLIS, 1999). Tal processo se dá a partir do ciclo da cadeia alimentar do qual a avifauna faz parte. A dieta alimentar das aves marinhas é composta principalmente por peixes e moluscos, tornando seus excrementos ricos em diversos nutrientes, como nitrogênio, fósforo e cálcio (HUTCHINSON, 1950; ANDERSON & POLIS, 1999). Ao estabelecer a área de nidificação, centenas de milhares de aves marinhas excretam uma solução semi sólida de ácido úrico (uma substância estável e insolúvel), que, ao invés de se submeter à decomposição, pode se acumular em quantidades suficientes para constituir um depósito geoquimicamente significativo, contendo elementos e substâncias que reagem de maneiras específicas com o substrato com o qual está em contato. Tais excrementos acumulados são denominados guanós, que incorporam não só as excretas digeridas e não digeridas, como também materiais utilizados para a construção dos ninhos (HUTCHINSON, 1950). Este transporte de elementos derivados de ambientes marinhos, tais como o N, o P e o Ca, para ambientes insulares é um mecanismo de enriquecimento de nutrientes nos solos (IRICK et al., 2015).

A maioria dos autores considera o intemperismo de minerais primários como a principal fonte de nutrientes nos solos dos sistemas naturais (WALKER & SYERS, 1976; SMECK, 1985; NOVAIS & SMYTH, 1999). Nesses termos, o rompimento da estrutura cristalina os libera para a solução do solo, podendo ter como destino a absorção pelos organismos e plantas, a adsorção pelas cargas de superfície dos coloides (sendo assim dependente do pH e da natureza mineralógica destes) ou a própria neoformação de argilominerais.

A disponibilidade dos nutrientes no solo é controlada tanto pela ação geoquímica a partir das reações derivadas da pedogênese, quanto por processos biológicos. Em escala global e ao longo do tempo geológico, os processos geoquímicos conectam a movimentação e distribuição do fósforo, nitrogênio e demais elementos a partir dos ciclos biogeoquímicos, tanto nos solos dos continentes quanto nos sedimentos marinhos. Assim, processos geoquímicos determinam, em longo prazo, a distribuição e disponibilidade destes nos solos. Em curto prazo, os processos biológicos têm maior influência (CROOS & SCHLESINGER, 1995). Geralmente, ao assumir o papel dos processos biológicos, os autores fazem menção aos nutrientes derivados da matéria orgânica do solo e sua eventual decomposição pelos microrganismos. Poucos foram aqueles que fizeram referência à incorporação através da intensa nidificação biológica, em especial da avifauna, tão característica de ambientes insulares tropicais e polares.

O *input* de fósforo, nitrogênio e cálcio, e em taxas menores, de magnésio, potássio e sódio pelo guano representa uma das principais fontes destes elementos no solo, em especial em ambientes polares (KARKANAS & GOLDBERG, 2010). Os processos desencadeados pela ornitogênese (como são conhecidos) geralmente estão associados à área da nidificação da avifauna e às áreas mais próximas e passíveis de receber os excrementos, seja por depósito direto, percolação da solução lixiviada do excremento ou mesmo erosão de partículas. Dentre eles, o processo mais abordado é a fosfatização.

A fosfatização e seus produtos mais característicos foram primeiramente estudados na Antártica continental por Syroyetschkovskiy em 1959<sup>6</sup>. Atualmente, o ambiente antártico permanece como o mais estudado, sendo o campo de interesse de diversos estudos, como Tatur & Myrcha (1984); Myrcha *et al.* (1985); Tatur & Barczuk (1985); Tatur (1989); Myrcha & Tatur (1991); Schaefer *et al.* (2004); Simas *et al.* (2007); Pereira *et al.* (2013). Em se tratando de ambientes tropicais, focando as ilhas oceânicas brasileiras, destacam-se os trabalhos de Oliveira *et al.* (2010), Schaefer *et al.* (2010) e Oliveira *et al.* (2014).

Tatur & Myrcha (1984) ao estudarem os produtos da ornitogênese reconheceram que nas áreas de pinguineira o terreno pedregoso mais solto é preenchido com os produtos da mineralização do guano, além das reações derivadas da interação entre a solução ornitogênica e o substrato. Por meio deste processo se desenvolvem solos ornitogênicos e feições macromorfológicas nas rochas – como crostas, preenchimento de fraturas por fosfatos, eflorescências – transformando tanto a morfologia quanto a geoquímica dos substratos. O processo se inicia com a deposição do guano em superfície, elevando o pH e teores de diversos elementos. Vale lembrar que esse nível de pH favorece a precipitação de minerais estáveis em pH alcalino, a exemplo de minerais de Cálcio, como P-Ca. Com a decomposição do guano, ocorre a produção de ácidos sulfúrico e nítrico pela fauna microbiana, diminuindo o pH do meio e acelerando o intemperismo do substrato. Com a interrupção da deposição de guano fresco, a acidificação do solo promove a dissolução dos fosfatos de cálcio, e favorece ainda a precipitação de formas amorfas e cristalinas de P-Fe e P-Al (MYRCHA & TATUR, 1991; SCHAEFER *et al.*, 2010). O estudo sistemático de sequências de alteração, neoformação de minerais fosfáticos e solos ornitogênicos tem sido utilizado como indicador paleoquímico, sendo oportuno para a reconstituição paleogeográfica dos ambientes submetidos ao processo (KARKANAS & GOLDBERG, 2010).

Sobre a cobertura vegetal em áreas com influência da nidificação das aves, Myrcha & Tatur (1991) identificaram na Antártica relações edáficas perceptíveis entre solos ornitogênicos e a colonização biológica. Em pinguineiras atuais há

---

<sup>6</sup> apud TATUR, 1989.

poucas espécies colonizadoras, devido à alta eutrofização do ambiente, chegando a níveis tóxicos para as plantas, além da movimentação intensa de milhares de pinguins. Apenas algumas espécies de algas, como a *prasiola sp.* estão adaptadas ao ambiente, sendo indicadoras de ornitogênese atual. À medida que se afasta da pinguineira, há colonização biológica por líquens e musgos. Em pinguineiras abandonadas verificam-se ainda os altos valores de nutrientes (marca típica da ornitogênese), mas em valores toleráveis, sendo as áreas em que de fato se desenvolvem a tundra antártica.

Em uma região com condições climáticas tão extremas a ponto de propiciar o intemperismo físico em detrimento do químico, e conseqüentemente com pedogênese tão restrita, a interação guano-substrato exerce papel fundamental na gênese dos solos. Em ilhas oceânicas tropicais, tal interação não possui a expressão dos ambientes polares, contudo exerce o mesmo papel na transformação de rochas e solos. Por tais motivos, um dos processos derivados da ornitogênese, a fosfatização, é entendida como um processo pedogenético (MYRCHA *et al.*, 1985; SCHAEFER *et al.* 2004; SIMAS *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2013).

Trindade é cenário da ocorrência de processos bastante específicos e espacialmente situados, que tornam ainda mais singular as suas coberturas. Trata-se de uma área importante para a nidificação de diversas espécies de aves migratórias, cujos excrementos (guanós) são depositados sobre substratos diversos (rochas, sedimentos, solos). A interação de tais excrementos com os substratos pode afetar os mesmos, sem que isso fosse objeto de nenhum estudo até o momento.

#### **1.4 Objetivos**

A compreensão de como a atividade biológica influencia na transformação e evolução dos substratos de um determinado ambiente suscita a necessidade de identificar os produtos supostamente relacionados a essa interação e, a partir deles, compreender como ela ocorre/ocorreu. Assim, a questão norteadora desse estudo é se tem ocorrido e quais seriam as principais

transformações associadas à interação avifauna-substratos na Ilha da Trindade.

Nesses termos, o objetivo geral deste estudo foi identificar as principais transformações geoquímicas e mineralógicas em substratos da Ilha da Trindade que estejam relacionadas à deposição de excrementos pela atividade da avifauna.

Nessa perspectiva, os objetivos específicos consistiram em:

- i. Identificar e caracterizar se solos situados em áreas nidificadas têm sido afetados pela mesma e como isso ocorreria e;
- ii. Identificar e caracterizar se rochas situadas em áreas nidificadas têm sido afetadas pela mesma e como isso ocorreria.

Baseado no exposto, o trabalho foi construído a partir da hipótese de que a interação da avifauna ocorreu/ocorre em um substrato litológico bastante diversificado e que isso permite a gênese de materiais e feições específicas, mas com aspectos mineralógicos, geoquímicos e morfológicos singulares; que seriam inexistentes caso não houvesse a interação guano-substratos. Além disso, a dinâmica de remobilização erosiva e geoquímica de materiais e solutos na Ilha deve ser considerada como um fator importante na ampliação da zona de influência do guano, permitindo o acúmulo de solução lixiviada e nutrientes mesmo em áreas com menor colonização de ninhais.

Como forma de apresentar os resultados e discussões obtidos a partir dos objetivos propostos, o trabalho foi estruturado em dois capítulos. O primeiro capítulo trata do processo de interação guano-solos de Trindade, considerando solos derivados dos três principais grupos litológicos existentes na Ilha: vulcanismo alcalino, vulcanismo básico e sedimentos bioclásticos carbonáticos. O segundo capítulo trata do processo de interação guano-rochas e suas feições e alterações, destacando litotipos vulcânicos alcalinos e básicos.

## 1.5 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M. Geologia e Petrologia da ilha da Trindade. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1961, 197 p.

ALMEIDA, F.F.M. Petrologia da Ilha da Trindade. Tese para concurso à cátedra da USP. São Paulo, 1962, 223p.

ALMEIDA, F. F. M. Ilha de Trindade – registro de vulcanismo cenozoico no Atlântico Sul. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBET-BORN, M. L. C. (Eds.). Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil. 1ª ed., Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, Brasília, DF, Brasil. 2002, p.369-377.

ALMEIDA, F. F. M. Ilhas oceânicas brasileiras e sua relação com a tectônica atlântica. *Terræ Didactica*, 2(1): 3-18, 2006.

ALVES, R. J. V. Ilha da Trindade & Arquipélago Martin Vaz – um ensaio geobotânico. Serviço de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1998, 144p.

ALVES, R. J. V. Terrestrial vascular floras of Brasil's oceanic archipelagos. In: ALVES, R. J. V.; CASTRO, J. W. A. (orgs.). Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. MMA Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Brasília, Brasil, 2006, p.83-104.

ANDERSON, W. B.; POLIS, G. A. Nutrient fluxes from water to land: seabirds add to plant nutrient status on Gulf of California islands. *Oecologia*, 118:324-332, 1999.

AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. A.; DALMOLIN, R. S. D. A evolução da vida e as funções do solo no ambiente. In: *Tópicos em Ciência do solo*, v. V, 2007, p.1-48.

BARTH, R. Observações biológicas e meteorológicas feitas na Ilha Trindade. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, Rio de Janeiro, v. 56, n.1, p.261-289, 1958.

BOCKHEIM, J. G. Soil endemism and its relation to soil formation theory. In: Geoderma, 129:109-124. 2005.

CASTRO, J. W. A., ANTONELLO, L. L. Geologia das ilhas oceânicas brasileiras. In: Alves, R. J. V., CASTRO, J. W. A. (Eds.) Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. Brasília. Ministério do Meio Ambiente. 2006, p. 29-57.

CASTRO, J. W. A. Geologia ambiental das ilhas oceânicas de Trindade e Fernando de Noronha, Brasil. In: MOHR, L. V., CASTRO, J. W. A., COSTA, P. M. S., ALVES, R. J. V. (Eds.) Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. Brasília. Ministério do Meio Ambiente. 2009, p. 33-53.

CLEMENTE, E. C. Ambientes terrestres da Ilha da Trindade, Atlântico Sul: caracterização do solo e do meio físico como subsídio para a criação e uma unidade de conservação. Doutorado (tese do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. 2006, 167p.

CLEMENTE, E. P.; SCHAEFER, C. E.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; ALVES, R. J.; MELO, V. S. Solos “endêmicos” da Ilha da Trindade. In: ALVES, R. J.; CASTRO, J.W.C. org. Ilhas oceânicas brasileiras – Da pesquisa ao manejo. Brasília, Ministério do Meio Ambiente. 2006, p.59-82.

CLEMENTE, E. P. SCHAEFER, C. E.; OLIVEIRA, F. S.; ALBUQUERQUE-FILHO, M. R., ALVES, R.V., SÃ, M. M. F.; MELO, V. S. Toposequência de solos na Ilha da Trindade, Atlântico Sul. R. Bras. Ci. Solo v. 33, p. 1357-1371, 2009.

CLEMENTE, E. P.; SCHAEFER, C. E.; OLIVEIRA, F. S. Proposta de zoneamento ambiental para a Ilha de Trindade (ES). In: Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2011, 27p.

CORDANI, U. G. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. Inst. Geoc. Astron. USP. São Paulo, 1:9-75, 1970.

DUARTE, R. H., HORTA, G. C. M. M. Barth e a Ilha da Trindade, 1957-1959. História, Ciências, Saúde – Manguinhos, Rio de Janeiro, v.19, n.3, jul.-set. p.951-968. 2012.

FERRARI, A. L., RICCOMINI, C. Campos de esforços plio-pleistocênicos na Ilha de Trindade (Oceano Atlântico Sul, Brasil) e sua relação com a tectônica regional. *Revista brasileira de Geociências*, 29:195-202, 1999.

FONSECA, G. A. B., MITTERMEIER, R. A., MITTERMEIER, C. G. Conservation of island biodiversity – importance, challenges and opportunities. Center of Applied Biodiversity Sciences, Conservation International. Washington, DC, USA, 2006, 16 p.

GOTELLI, N. J. *Ecologia*. 4ª edição, Londrina: Editora Planta, 2009, 287p.

GUO, Y.; GONG, P.; AMUNDSON, R. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*. n.117. p.99-115, 2003.

HUTCHINSON, G. E. Survey of contemporary knowledge of biogeochemistry. 3 – The biogeochemistry of vertebrate excretion. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, v. 96, 1950, 279p.

IRICK, D. L.; GU, B.; LI, Y. C.; INGLETT, P. W.; FREDERICK, P. C.; ROSS, M. S.; WRIGHT, A. L.; EWE, S. M. L. Wading bird guano enrichment of soil nutrients in tree islands of the Florida Everglades. *Science of the Total Environment*, 532:40-47, 2015.

JENNY, H. *Factor of soil formation: a system of quantitative pedology*. New York: McGraw-Hill. 1941, 281p.

KARKANAS, P.; GOLDBER, P. Phosphatic features. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier, 2010, p.521-541.

MARIN, C., DEDA, P., MULONGOY, J. K. Island biodiversity – sustaining life in vulnerable ecosystems. *INSULA, International Journal on Island Affairs, Special Issue, UNESCO*, 2004, 130p.

MARTINS, E. O. Amazônia Azul, pré-sal, soberania e jurisdição marítima. *Revista CEJ*, ano XIV, nº 50, p. 83-88, jul./set. 2010.

MISUZAKI, A. M. P., THOMAZ FILHO, A.; MILANI, E. J., CÉSERO, P. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in northeastern Brazil. *Journal South American Earth Science*, 15:183-198. 2002.

MYERS, R. A., MITTERMEIER, R. A., MITTERMEIER, C. G., FONSECA, G. A. B; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858, 2000.

MYRCHA, A., PIETR, S.J., TATUR, A. The role of Pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), *Antarctic nutrient cycles and food webs*. Springer-Verlag, Berlin, p. 156-163, 1985.

MYRCHA, A., TATUR, A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, 12, 1:3-24, 1991.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999, 399p.

OLIVEIRA, F. S. Fosfatização em solo e rocha em ilhas oceânicas. Mestrado (dissertação do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. 2008, 115p.

OLIVEIRA, F. S., ABRAHÃO, W. A. P., SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 63(2): 239-246, 2010.

OLIVEIRA, F. S., SCHAEFER, C. E. G. R., ABRAHÃO, W. A. P., CLEMENTE, E. P., SIMAS, F. N. B. Soil-geomorphology interactions and paleoclimatic implications of an ornithogenic soil toposequence on Rata Island, Fernando de Noronha Archipelago, South Atlantic. *Journal of South American Earth Sciences*, 52:119-128, 2014.

PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, I. C. C. Micromorphological and microchemical indicators of

pedogenesis in ornithogenic cryosols (gelisols) of Hope Bay, Antarctic Peninsula. *Geoderma*, 193-194, 311-322, 2013.

POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M. ; GUILLOT, S. Princípio de Geologia: técnicas, modelos e teorias. 14 ed, Porto Alegre: Bookman, 2013, 1017p.

RIBEIRO, P. A. Expedição à Ilha da Trindade. *Revista Brasileira de Geografia*. Rio de Janeiro, 13(2): 293-314, 1951.

ROBERTS, C. M., McCLEAN, C. J., VERON, J. E. N., HAWKINS, J. P., ALLEN, G. R., McALLISTER, D., MITTERMEIER, C., SCHUELER, F. W., SPALDING, M., WELLS, F., VYNNE, C., WERNER, B. Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs. *Science*, 295, 1280-1284, 2002.

SÁ, M. M. F. Caracterização ambiental, classificação e mapeamento dos solos da ilha da Trindade, Atlântico Sul. Mestrado (Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, 2010, 58 p.

SERAFINI, T. Z., FRANÇA, G. B., ANDRIGUETTO-FILHO, J. M. Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 8, 1-21, 2010.

SCHAEFER, C.E.G.R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R., MICHEL, R.F.M., VIANA, J.H.M., TATUR, A. Fosfatização: processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: SCHAEFER, C.E.G.R., FRANCELINO, R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE FILHO, R. (eds.), *Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT e Departamento de Solos, Viçosa, 2004, p. 47-59.

SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B., ALBUQUERQUE, M. A., SOUZA, E., DELPUPO, K. K. Fosfatização de solos e evolução da paisagem no arquipélago de Abrolhos, BA. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 63(4): 727-734, 2010.

SCHAEFFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, F. S. Brazil in the South Atlantic: The Fernando de Noronha and Trindade Archipelagos. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A.; SANTOS, L. (org.) Landscapes and Landforms of Brazil. 1ed. Netherlands: Springer, 2015, p. 65-78.

SILVA, A. P. O novo pleito brasileiro no mar: a plataforma continental estendida e o projeto Amazônia Azul. Revista Brasileira de Política Internacional, vol. 56, nº 1, p. 104-121, 2013.

SIMAS, F. N. B., SCHAEFER, C. E. G. R., MELO, V. F., ALBUQUERQUE-FILHO, M. R., MICHEL, R. F. M., PEREIRA, V. V., GOMES, M. R. M., COSTA, L. M. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process. Geoderma, 138: 191-203, 2007.

SVERDRUP, H. Chemical weathering of soil minerals and the role of biological processes. Fungal Biology Reviews, 23: 94-100, 2009.

SMECK, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. Geoderma, 36: 185-199, 1985.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime antarctic. Polish Polar Research 4, 481–532, 1989.

TATUR, A., BARCZUK, A. Ornithogenic phosphates on King George Island, Maritime Antarctic. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), Antarctic nutrient cycles and food webs. Springer-Verlag, Berlin, 1985, p. 163-169.

TATUR A., MYRCHA A. Ornithogenic soils on King George Island (maritime Antarctic zone). Polish Polar Research, 5:31-60, 1984.

ULBRICH, M. N. C., MARQUES, L. S., LOPES, R. P. As ilhas vulcânicas brasileiras: Fernando de Noronha e Trindade. In: MANTESSO-NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C. D. R., NEVES, B. B. B (eds.) Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004, p.555-573.

VILES, H. Ecological perspectives on rock surface weathering: towards a conceptual model. *Geomorphology* 13:21-35, 1995.

WALKER, T. W., SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15: 01- 19, 1976.

WALTER, H. S. The mismeasure of islands: implications for biogeographical theory and the conservation of nature. *Journal of Biogeography*, 31, 177-197, 2004.

ZARINATO, S. H. Estratégias brasileiras de poder e territorialização para o controle de ilhas do Atlântico Sul. *Scripta Nova. Revista Eletrônica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, vol. XVI, nº 418, 2012.

# CAPÍTULO 1 – SOLOS AFETADOS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL

## 2.1 Introdução

Definidos como porções terrestres no assoalho oceânico individualizadas por água, reduzindo a acessibilidade e conexões com porções continentais (WALTER, 2004), ambientes insulares oceânicos despertam o interesse científico principalmente devido ao seu isolamento geográfico. Todos os elementos e fenômenos geoambientais característicos desses ambientes, como variações no nível do mar e das correntes oceânicas, variações climáticas, litológicas e geomorfológicas, associam-se ao referido isolamento geográfico e colonização biológica, como da avifauna, na geração de endemismos, incluindo a formação e espacialidade dos solos (BOCKHEIM, 2005; CLEMENTE *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

No caso da Ilha da Trindade, os pedoambientes em muito favorecem a ocorrência de solos endêmicos (CLEMENTE *et al.*, 2006), ou endemismo edáfico, conforme Bockheim (2005). Os solos da Ilha são formados a partir de materiais vulcânicos subsaturados em SiO<sub>2</sub> e constituem, provavelmente, o vulcanismo mais sódico do mundo (ALMEIDA, 1962; CLEMENTE, 2006). Tais materiais conduzem à gênese de solos que são, considerando o território brasileiro, identificados apenas em Trindade. Um exemplo são os Andossolos (*Andisols* na classificação da *Soil Taxonomy*), solos derivados de rochas ígneas com muito vidro vulcânico que, após intemperismo, ficam ricos em propriedades ândicas típicas de minerais amorfos, como alofanos, imogolita, ferrihidrita e complexos de Al-húmicos (SÁ, 2010). Além desses, ocorrem solos associados a sedimentos biogênicos, compostos quase exclusivamente de areia carbonática e, diferentemente dos solos de áreas litorâneas continentais, com quartzo ausente. Trindade é um ambiente pedogeneticamente *sui genesis*, de forma que sua cobertura pedológica apresenta dificuldades de enquadramento no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013). Todo esse conjunto de particularidades aponta para a necessidade de estudos mais aprofundados na área.

Corroborando com sua singularidade pedológica, em Trindade ocorrem solos em áreas onde a nidificação de aves é frequente, considerando ser a ilha hábitat temporário de muitas espécies (FONSECA NETO, 2004). Conforme indicado por Alves (1998), Clemente (2006) e mapeado por Sá (2010), a ilha apresenta um mosaico pedológico variado, com estreita relação com os materiais de origem, posição na paisagem e, supostamente, processos associados à interferência biológica, como da avifauna. Estudos em outras ilhas situadas em ambientes polares (TATUR & MYRCHA, 1984; MYRCHA *et al.*, 1985; TATUR & BARCZUK, 1985; TATUR, 1989; MYRCHA & TATUR, 1991; SCHAEFER *et al.*, 2004; SIMAS *et al.*, 2007; PEREIRA *et al.*, 2013) e em domínios tropicais (OLIVEIRA *et al.*, 2010; SCHAEFER *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2014) demonstraram que tais solos podem ser fortemente afetados pela deposição de excrementos, resultando em transformações mineralógicas e geoquímicas importantes, variando em função das características da colonização e dos substratos.

A partir disso, o objetivo deste estudo foi identificar e caracterizar solos situados em áreas nidificadas na Ilha da Trindade afetados pela deposição de excrementos, reconhecendo as possíveis transformações geoquímicas e mineralógicas associadas.

## **2.2 Materiais e métodos**

### **2.2.1 Área de estudo, coleta e preparo das amostras**

A escolha das áreas para a amostragem dos solos teve como referência a presença de ninhais e a diversidade litológica a partir da qual os solos são originados. Embora ocorra, a presença de ninhos diretamente sobre os solos é pouco comum em Trindade (FONSECA NETO, 2004), havendo, majoritariamente, ninhais nos afloramentos rochosos (necks e plugs). Ainda assim, é possível perceber que nas bordas desses afloramentos a influência ornitogênica ocorre, seja por uma ocupação episódica (repouso de pássaros nas áreas baixas e ninhais nas saias de talus), pela lavagem do guano (traços brancos nas rochas marcando o escoamento de excrementos) e pelo

desabamento de blocos excretados. Para contemplar a diversidade litológica, rochas de três grupos foram selecionadas: i) rochas vulcânicas alcalinas, ii) rochas vulcânicas básicas e iii) sedimentos bioclástico-carbonáticos. Considerando os dois critérios, e tendo como apoio os mapeamentos geológico (ALMEIDA, 1961) e pedológico (SÁ, 2010), as áreas que melhor atendiam aos interesses desse estudo estão situadas próximo às praias das Tartarugas e Cabritas (**Figura 2.1**).

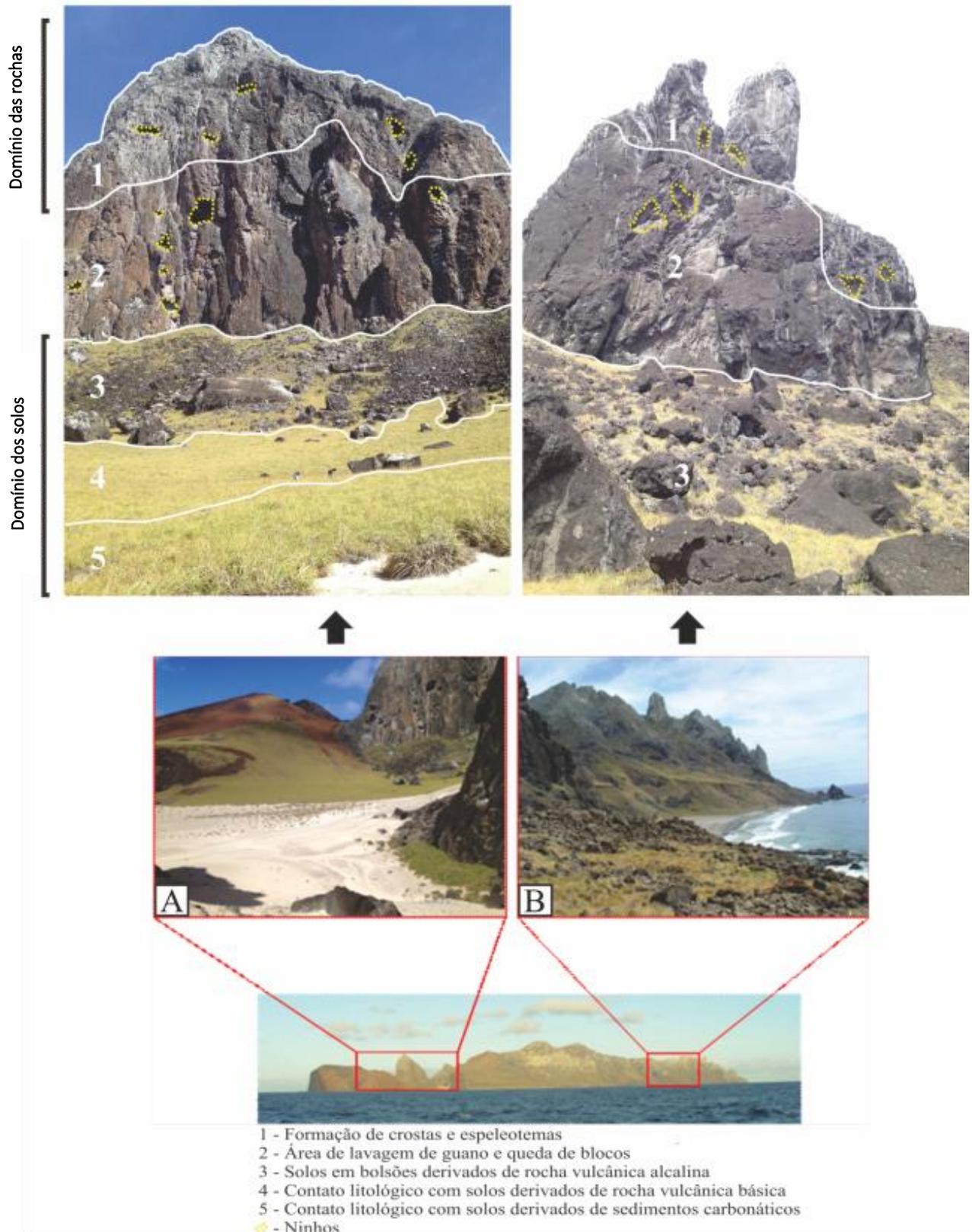
Na Praia das Tartarugas o solo originado de rochas vulcânicas básicas foi coletado na Formação Vulcão do Paredão (**Figura 2.1A**), especificamente na porção sul do cone de vulcão homônimo (ALMEIDA, 1961; CASTRO & ANTONELLO, 2006). Também na Praia das Tartarugas foi coletado solo associado aos sedimentos bioclásticos; neste caso, em área coberta por vegetação, indicando estabilização das dunas formadas pelo retrabalhamento eólico desses sedimentos.

Na Praia das Cabritas (**Figura 2.1B**) foi coletado o solo de rochas vulcânicas alcalinas. A área se insere na transição entre um planalto central e as encostas costeiras, sobre rocha do Complexo de Trindade (ALMEIDA, 1961). Trata-se de superfícies rochosas que decaem abruptamente até a zona costeira, com grande acúmulo de blocos soltos de diferentes tamanhos, formando depósitos de tálus que bordejam os picos. A cobertura pedológica está espacialmente distribuída entre estes depósitos, formando bolsões entre os fragmentos rochosos.

Associado a cada um dos materiais litológicos foram coletadas amostras do *topsoil* (0-20 cm) de perfis descritos por Sá (2010) como sendo Neossolos Litólicos, Neossolos Regolíticos e Cambissolos Háplicos. As amostragens foram feitas próximo aos afloramentos com ninhais e distantes desses, aproximadamente 60 metros. Além disso, foram coletadas amostras do material de origem desses solos (rocha ou sedimento) sem influência da avifauna. Em tese, tais amostras funcionam como controle para dimensionar o enriquecimento em nutrientes após a interação com o guano (**Quadro 2.1**). Foram coletadas amostras deformadas para análises físicas, químicas e mineralógicas, sendo secas ao ar, destorroadas e passadas por peneiras de 2

mm para se obter a terra fina seca ao ar (TFSA); e amostras indeformadas para a confecção de lâminas delgadas para a análise micromorfológica.

**Figura 2.1** – Áreas selecionadas para o estudo. A) Praia das Tartarugas e B) Praia das Cabritas



**Quadro 2.1 – Relação de amostras coletadas**

Área de Coleta	Geologia	Código	Rocha / Solo	Posição de Coleta
Praia das Tartarugas	Vulcanismo Básico Formação Vulcão do Paredão	TA1	Rocha - Ankaratrito	Afloramento rochoso na parte inferior da cratera vulcânica sem a presença de ninhais
		TA2	Cambissolo Háplico Ta eutrófico típico	Sopé da vertente na base da cratera vulcânica distante (20m) de afloramento rochoso com ninhais
		TA3		Sopé da vertente na base da cratera vulcânica próximo a afloramento rochoso com ninhais
Praia das Cabritas	Sedimentos Biogênicos Carbonáticos	TS1	Sedimentos não consolidados	Porção superior de duna não vegetada
		TS2	Neossolo Regolítico eutrófico bioclástico-carbonático	Porção inferior de duna vegetada afastada de afloramento rochoso com ninhais
		TS3		Porção superior de duna vegetada próximo a afloramento rochoso com ninhais
Praia das Cabritas	Vulcanismo Alcalino Complexo de Trindade	CK1	Rocha - Kali-gaueíte	Pináculos rochosos sem a presença de ninhais
		CK2	Neossolo Litólico distrófico típico	Bolsões de solos entre fragmentos na base de talus afastado (60 m) de afloramento rochoso com ninhais
		CK3		Bolsões de solos entre fragmentos na porção superior de talus próximo a afloramento rochoso com ninhais

### 2.2.2 Análises físicas, químicas e mineralógicas

A granulometria e a química de rotina foram realizadas no Laboratório de Física do Solo e no Laboratório de Rotina do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Ambas foram obtidas conforme procedimentos da Embrapa (1997) e Almeida *et al.* (2012).

Nas análises físicas, foram quantificadas as frações granulométricas areia, silte e argila (análise textural). As amostras foram dispersas quimicamente com 10mL de NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> e agitadas lentamente por 16 horas. A fração areia foi

separada por peneiramento (areia fina < 0,053 mm e areia grossa >0,2 mm). As frações silte e argila foram separadas através da sedimentação diferencial, segundo a Lei de Stokes, utilizando o método da pipeta. Os resultados em % foram plotados no diagrama ternário areia-silte-argila para obtenção da classe textural (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Com relação às análises químicas, determinou-se o pH em água em solução de KCl 1 mol. L<sup>-1</sup> com medição pelo método potenciométrico em suspensão solo:solução igual a 1:2,5. O Cálcio e magnésio trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol/L em pH 7,0, e dosados através do espectrofotômetro de absorção atômica. Potássio e sódio trocáveis foram extraídos com solução de HCl 0,05 mol/L e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 mol/L (Mehlich 1), sendo dosados pelo espectrofotômetro de emissão de chama. O Alumínio trocável foi extraído com KCl 1 mol/L, determinado por titulação com NaOH 0,025 mol/L. Acidez extraível (H<sup>+</sup> + AL<sup>3+</sup>) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol/L ajustada a pH 7,0 e determinada por titulação com NaOH 0,06 mol/L. O fósforo foi extraído com Mehlich -1 e determinado pelo espectrofotômetro de absorção molecular (Colorimetria). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley-Black e a matéria orgânica estimada pela equação: Carbono Orgânico x 1,724.

As análises mineralógica e geoquímica total foram realizadas na TFSA e na fração argila+silte (< 0,05 mm), respectivamente por Difractometria de Raios-X (DRX) e Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX). No primeiro caso, as amostras foram acondicionadas em um porta amostras de alumínio e levadas ao Difractômetro Shimadzu modelo XRD-7000 com radiação de CuK $\alpha$ , no intervalo de 2 a 70° 2 $\theta$ . Os difratogramas foram interpretados no Software X'Pert HighScore Plus e através de padrões da literatura (BRINDLEY & BROWN, 1980). Essa análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do CEFET MG. A FRX, por sua vez, foi realizada para quantificação dos elementos Na, K, Mn, Mg, Ca, Fe, Al, Ti, P e Si. Foi utilizado um equipamento Philips, PW2404 do Modelo MagiX com amostrador automático PW2504 e Tubo de Rh a 2,4kW. Na análise, 5 g de material pulverizado foi calcinado em intervalos de 15 min a 550 °C e 2 horas a 1000 °C e posteriormente fundido em pastilhas com metaborato de lítio. Os teores foram reportados em óxidos (% em peso). A análise foi realizada pelo Laboratório

### **2.2.3 Análises micromorfológicas e petrográficas em seções finas**

A caracterização microscópica e microanalítica de seções delgadas objetivou identificar as principais microestruturas presentes. As amostras indeformadas coletadas foram impregnadas com resina e submetidas à confecção de lâminas polidas. A descrição micromorfológica das lâminas foi realizada em microscópio óptico trinocular com luz transmitida e refletida da marca Zeiss (modelo Axioskop 40), com câmera integrada para registro das fotomicrografias. As descrições microestruturais foram baseadas nas recomendações de Stoops (2003). Sítios mais representativos observados nas descrições micromorfológicas foram selecionados para observação no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo QUANTA FEI 3D acoplado com 4 sensores de espectroscopia EDS, do Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais. As lâminas selecionadas foram recobertas com filme condutor de carbono e montadas em suporte metálico, sendo obtidas imagens de elétrons retroespalhados.

### **2.3 Resultados: caracterização geral dos materiais investigados**

Os resultados das análises textural e química (rotina) são apresentados, respectivamente, nas **Tabelas 2.1 e 2.2**. Não são apresentados resultados para as amostras TA1 e CK1 considerando se tratarem de rochas. A composição química total por FRX e a mineralogia por DRX é apresentada na **Tabela 2.3**.

**Tabela 2.1** – Análise textural das amostras analisadas.

AMOSTRAS	Frações granulométricas < 2 mm					Classe Textural
	Areia		Silte	Argila	Silte/Argila	
	Grossa	Fina				
	-----dag/Kg-----					
	<i>Vulcanismo Básico</i>					
TA1	-	-	-	-	-	-
TA2	32	10	29	29	1	Franco-argilosa
TA3	36	27	24	13	1,84	Franco-arenosa
	<i>Bioclastos Carbonáticos</i>					
TS1	83	11	0	6	0	Areia
TS2	71	24	1	4	0,25	Areia
TS3	64	21	7	8	0,87	Areia-franca
	<i>Vulcanismo Alcalino</i>					
CK1	-	-	-	-	-	-
CK2	22	18	38	22	1,72	Franco
CK3	26	24	27	23	1,17	Franco-argilo-arenosa

**Tabela 2.2 – Atributos químicos dos perfis analisados**

AMOSTRAS	pH		P mg/dm <sup>3</sup>	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	SB	T	V	m	ISNA %	MO dag/Kg	P-Rem mg/L
	H <sub>2</sub> O	HCl														
<i>Vulcanismo Básico</i>																
TA1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TA2	7,48	6,32	33	179	6,9	11,84	6,4	0	4,5	18,73	23,23	80,6	0	0,13	1,94	22,8
TA3	7,88	6,84	857	450	368,8	17,56	5,3	0	1,9	25,61	27,51	93,1	0	5,83	2,20	23,3
<i>Bioclastos Carbonáticos</i>																
TS1	7,69	8,31	79,5	9	74,9	3,65	0,53	0	0,2	4,53	4,73	95,8	0	6,88	0,52	34,3
TS2	7,87	7,80	454,5	25	101,8	4,88	0,51	0	0,0	5,90	5,90	100	0	7,50	2,39	37,5
TS3	7,89	7,97	852,0	30	163,8	11,27	1,56	0	0,0	13,62	13,62	100	0	5,23	2,84	17,7
<i>Vulcanismo Alcalino</i>																
CK1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CK2	6,86	5,57	672,1	470	1168,2	8,93	10,69	0	4	25,9	29,90	86,6	0	16,99	0,97	26,4
CK3	7,52	6,09	987,6	520	418,7	9,44	10,08	0	2,4	22,67	25,7	90,4	0	7,26	0,32	38,7

**Tabela 2.3** – Teores químicos totais obtidos por FRX e mineralogia obtida por DRX

AMOSTRAS	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI	Mineralogia (DRX)	
	% em peso											TFSA ou Rocha	Argila+Silte
<i>Vulcanismo Básico</i>													
TA1	39,2	10,2	14,5	11,7	11,9	4,85	0,987	2,99	0,56	0,2	2,67	an+nf+ov+ap+ag+mg+mc	-
TA2	34,6	11,1	19,8	8,03	11,9	6,81	1,169	0,89	0,95	0,2	4,74	hm+ag+dp+mc+ap	hm+ag+mc
TA3	38,2	10,9	15,6	8,41	11,5	5,01	1,704	1,6	1,72	0,19	5,11	hm+ag+dp+ap	hm+ag+ap+mc
<i>Bioclastos Carbonáticos</i>													
TS1	9,18	2,09	4,15	39,8	7,27	1,13	0,29	0,67	0,25	0,04	34,2	ca/ag+mg+al+an+hm	-
TS2	21	4,35	9,41	27,3	13,5	2,36	0,615	1,06	0,46	0,11	21,3	ca/ag+al+hm+ap	ca/ag+hm
TS3	18,6	4,6	8,33	28	10,4	2,31	1,353	0,81	0,46	0,09	23,79	ca/ag+al+hm+ap	ca/ag+hm+ap
<i>Vulcanismo Alcalino</i>													
CK1	46	13,9	11	9,43	5,09	2,94	0,895	2,11	3,46	0,23	4,44	an+nf+ag+tn+ap+ze+mg+mc	-
CK2	39,4	16,2	15,3	6,46	5,21	4,57	1,328	1,1	2,33	0,27	6,94	ag+dp+tn+mc+k+nf	ag+tn+k
CK3	40,1	14,8	15,2	8,07	5,75	4,75	1,679	1,23	2,48	0,27	5,1	ag+dp+mc+ap+k+tn	ag+tn+k

an = anfíbólio; nf = nefelina; ag = augita; tn = titanita; ap = apatita; ze = zeólita; mc = mica; ov = olivina; ca = calcita; ag = aragonita; hm = hematita; dp = diopsídio; al = alunita

### 2.3.1 Solos associados a derrames vulcânicos de natureza básica

A granulometria das amostras associadas aos derrames vulcânicos de natureza básica da Formação Vulcão do Paredão (TA2 e TA3) apresentou diferenças (**Tabela 2.1**). TA2 possui mais constituintes finos (principalmente argila) que TA3. Por consequência, foi classificada com textura franco-argilosa enquanto TA3 possui textura franco-arenosa. Apesar dessa pequena diferença, a fração predominante é areia, principalmente areia grossa, com valores que superam 40% no total. Como não há quartzo como constituinte mineral nessas rochas (ALMEIDA, 1961; ANTONELLO *et al.*, 2009), a areia é composta pelos próprios fragmentos de rocha e/ou fenocristais de minerais ferromagnesianos, como piroxênios. A relação silte/argila apresenta valores altos (**Tabela 2.2**), evidenciando a jovialidade destes solos e corroborando com o que foi apontado por Clemente *et al.* (2006) e Sá (2010).

Com relação aos atributos químicos, as amostras possuem valores altos de pH em H<sub>2</sub>O e KCl (**Tabela 2.2**), sendo classificadas como alcalinas (ALVAREZ, *et al.*, 1999). O ΔpH equivale a -1,16 para TA2 e -1,04 para TA3. Tal resultado indica solos eletronegativos, interpretados como pedogeneticamente jovens e com provável presença de argilominerais de alta atividade. Além dos altos valores de pH, as amostras apresentaram elevados conteúdo de bases e baixa

atividade de  $H^+$  e  $Al^{3+}$ , com saturação nula por alumínio. Tais atributos são, conforme Rolim Neto *et al.* (2009), comuns em solos pouco intemperizados de rochas basálticas. Em termos de disponibilidade de nutrientes, as amostras evidenciam solos altamente eutróficos e o conteúdo de matéria orgânica é semelhante nas duas amostras. Em se tratando dos teores de P trocável, TA2 apresentou 33 mg/dm<sup>3</sup> e TA3 apresentou valores bem mais elevados, 857 mg/dm<sup>3</sup>. Outros cátions trocáveis também aumentam na comparação entre TA2 e TA3, com maior destaque para K e Na, e menor para Ca (**Tabela 2.2**).

Na composição química total (**Tabela 2.3**), as rochas vulcânicas básicas, a exemplo de outras em Trindade, são subsaturadas em SiO<sub>2</sub> e com elevados teores sódico-alcálicos (ALMEIDA, 1962). Dentre os episódios vulcânicos, a Formação Vulcão do Paredão corresponde àquela mais subsaturada em sílica, o que ficou evidenciado pelo baixo conteúdo de SiO<sub>2</sub> encontrado em TA1: 39,2%. Tal valor permite a classificação dessas amostras como ultrabásicas. As amostras dos solos TA2 e TA3, por sua vez, apresentam valores ainda menores que a rocha (34,6 e 38,2%, respectivamente), provavelmente porque as condições alcalinas vigentes favorecem a dissolução da sílica (PEREIRA *et al.*, 2013). Nesses ambientes, os feldspatóides costumam ser os aluminossilicatos mais abundantes, os quais compensam durante sua formação ígnea a insuficiência em sílica através da substituição por K<sub>2</sub>O ou Na<sub>2</sub>O. Isso explica porque tais solos possuem em sua mineralogia grande quantidade de nefelinas (CLEMENTE, 2006). Vale destacar que os teores de Fe, Al, Ca e Mg são semelhantes na rocha, aumentando no solo, como é o caso do ferro, ou mantendo-se próximo dos teores reportados no material de origem. Com relação ao fósforo, os valores em porcentagens totais sugerem enriquecimento, da ordem de 0,987 no ankaratrito (TA1) para 1,169 em TA2 e 1,704 em TA3.

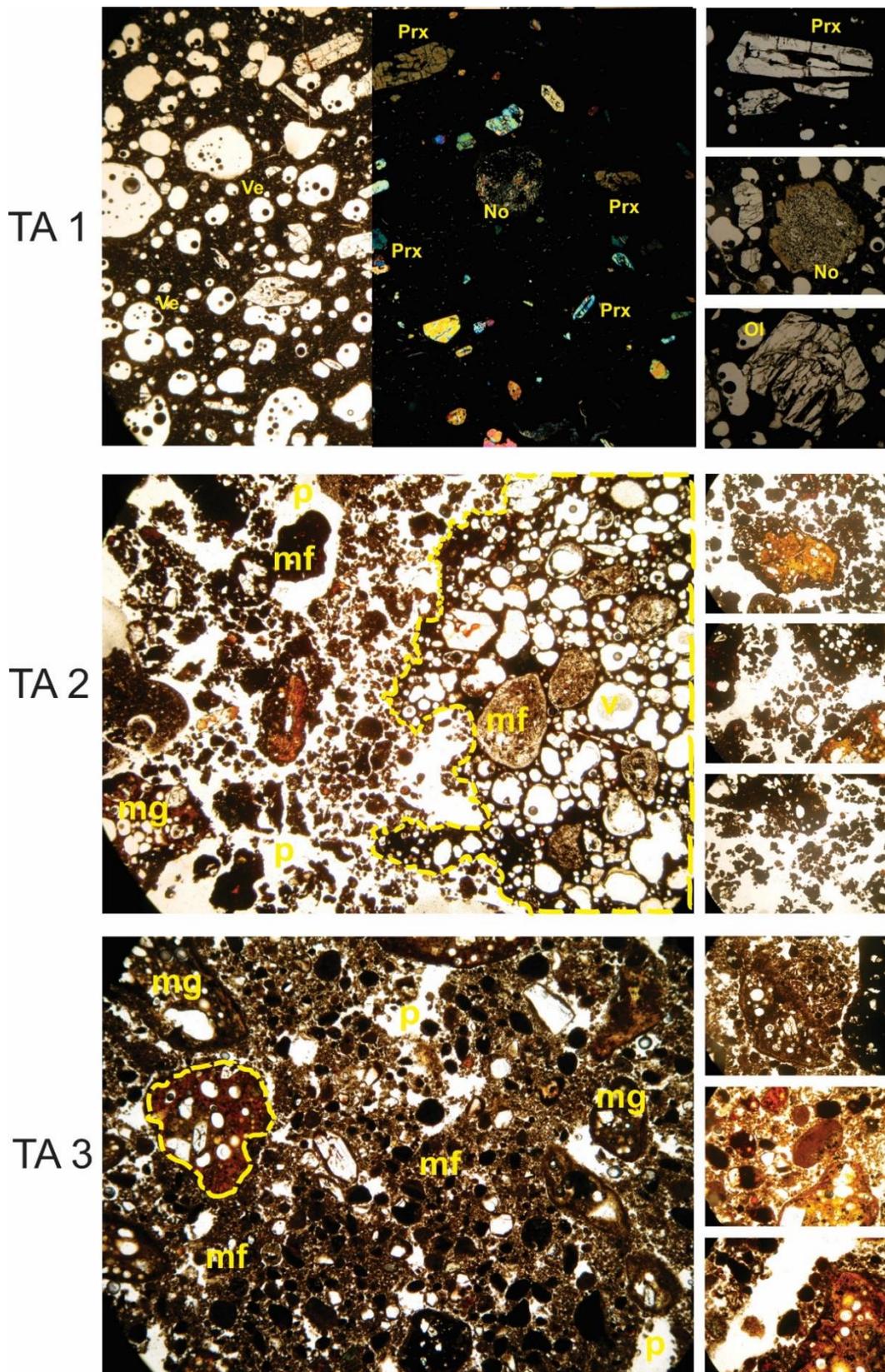
Mineralogicamente, a análise de DRX do ankaratrito (TA1) permitiu a identificação de diversos minerais, com destaque para augita, nefelina, magnetita e mica (**Tabela 2.3**). Essa mineralogia é corroborada pela caracterização petrográfica em escala microscópica, que revelou se tratar de rocha ultrabásica de origem extrusiva porfirítica, sendo melanocrática nefelina basalto com biotita (ANTONELLO *et al.*, 2009). As seções finas evidenciam a

presença de olivinas, clinopiroxênios, magnetitas e noseanas, além dos poros vesiculares (**Figura 2.2**). Petrograficamente possui matriz vítrea, composta por fenocristais de olivina idiomórficas, piroxênios hipidiomórficos e vesículas arredondadas em quantidade expressiva. As olivinas apresentam estrutura esquelética devido a corrosão do magma, as quais se encontram muito fraturadas, com alguns cristais já em fase de alteração para biotita e indigita. As ripas de piroxênio são levemente orientadas de acordo com a direção do fluxo do magma, com alguns cristais zonados. Não foi identificada apatita nas seções finas analisadas, embora ela tenha sido apontada por ANTONELLO *et al.* (2009) como um mineral acessório nessas rochas (<5%). . Por fim, destaca-se a presença de algumas amídalas preenchidas por zeólitas.

Em se tratando das amostras TA2 e TA3, a análise por DRX evidenciou a presença de hematita e augita tanto na fração pó total (TFSA) quanto argila + silte (**Tabela 2.3**). A apatita foi identificada como forma mineral fosfática presente na TFSA da amostra TA2 e em todas as frações na amostra TA3.

Micromorfológicamente, TA2 apresenta microestrutura granular fracamente desenvolvida (**Figura 2.2**). O sistema poroso é do tipo empacotamento complexo. No interior de fragmentos litorreliquiais alteromorfizados de vidro vulcânico (*sideromelane*) ocorrem poros cavitários (litoporos) no formato de vesículas, revelando o incipiente grau de alteração do material. Algumas vesículas estão parcialmente preenchidas por uma micromassa que pode ter sua origem a partir da degradação interna dos próprios fragmentos. O fundo matricial é constituído por uma micromassa bruno-avermelhada, com trama birrefringente indiferenciada, associada a grãos grossos de minerais ferromagnesianos, como piroxênios, olivinas e vidro vulcânico com graus variáveis de alteração. Os próprios fragmentos rochosos podem ser incluídos no material grosso. Há a presença de pontuações orgânicas na micromassa (queima?) que, por vezes, se confundem com magnetitas litorreliquiais. Observa-se que a porosidade está, em parte, associada ao rompimento e coalescência das vesículas. Esse rompimento descaracteriza a alteromorfização dos fragmentos vulcânicos e conduz à agregação da micromassa e minerais grossos na forma de grânulos.

**Figura 2.2** – Fotomicrografias das amostras associadas ao vulcanismo básico



As imagens à esquerda possuem aumento de 2,5x no microscópio petrográfico e as demais possuem aumento de 10x. Em TA1 a metade direita está sob nicóis cruzados. As abreviaturas correspondem à: Ve – vesículas; Prx – piroxênio; No – noseana; Ol – olivina, p – poros; mf – material fino; mg – material grosseiro. Em tracejado destaca-se fragmentos de vidro vulcânico.

Embora de grande ocorrência em solos derivados de materiais de origem vulcânica (STOOPS, 2007; SEDOV *et al.*, 2010), a gênese da microestrutura granular não é totalmente clarificada, considerando, por exemplo, que ela ocorre até mesmo em áreas profundas em que não há forte influência da bioturbação (STOOPS *et al.*, 2006; 2008).

TA3 é constituído, tal como TA2, por agregados granulares, porém com pedalidade mais desenvolvida, de moderada a forte. O sistema poroso é de empacotamento complexo, além de vesículas e canais intergranulares em alguns fragmentos de vidro e escória vulcânica ainda existentes. Esses fragmentos encontram-se mais alterados, com formato arredondado e em menor tamanho. A micromassa bruno-avermelhada associa-se a grãos grossos compostos pelos menos minerais observados em TA2, porém mais alterados. Ocorre uma distribuição relativa entre os constituintes finos e grosseiros do tipo quito-enulica, na qual agregados individualizados de material fino coexistem com grãos minerais grossos revestidos pela micromassa. Ocorrem raros restos orgânicos e pontuações de magnetita.

### **2.3.2 Solos associados a sedimentos bioclásticos carbonáticos**

Formados a partir dos sedimentos bioclásticos carbonáticos (TS1), os solos retratados pelas amostras TS2 e TS3 são constituídos basicamente pela fração areia, garantindo a todos os perfis a classe textural areia ou, como em TS3, areia-franca, em decorrência de um sutil aumento nas frações silte e argila.

O pH tanto dos sedimentos quanto dos solos é alcalino, com valores em torno de 7 (**Tabela 2.2**). O  $\Delta\text{pH}$  das amostras TS1, TS2 e TS3, por sua vez, apresentam valores positivos ou muito próximos a zero, quais sejam 0,62, -0,07 e 0,08, respectivamente. Tais solos derivam de sedimentos cuja constituição química é pobre em sílica, conseqüentemente sem composição para a formação de argilominerais. Assim, é provável que o balanço positivo de cargas tenha relação com a presença de fases carbonáticas na fração argila ou, ainda, com óxidos de ferro presentes, considerando que há uma contribuição subordinada de sedimentos minerais de origem vulcânica. Esses eventuais

minerais ferromagnesianos são oxidados em ambiente de pH elevado e de boa drenagem, formando hematita (FISCHER & SCHWERTMANN, 1975). Clemente (2006) ao caracterizar a mineralogia das areias na Praia das Tartarugas reconheceu a presença desses minerais ferromagnesianos e da própria hematita, como secundários e acessórios.

Todas as amostras coletadas apresentam elevado conteúdo de bases, sendo a saturação por bases extremamente alta, chegando a 100%. A saturação por alumínio e a acidez potencial são nulas, ao passo que a saturação por Na atribui caráter solódico aos materiais. Sua proximidade do mar e sua permeabilidade são fatores que contribuem para a penetração de soluções salinas no perfil, geralmente dispersas na forma de spray marítimo. Tais atributos também foram observados por Sá (2010), bem como apresentam as mesmas características descritas por Marques *et al.* (2007) na Ilha Fernando de Noronha (FN). Diferem-se dos solos observados em FN por um maior aporte de matéria orgânica (**Tabela 2.2**), pouco comum para solos tão permeáveis e em áreas com retrabalhamento eólico. Com relação ao P trocável, os resultados apontam teores de 79,5 mg/dm<sup>3</sup> em TS1, 454,5 mg/dm<sup>3</sup> em TS2 e 852,0 mg/dm<sup>3</sup> em TS3. TS2 e TS3 são, respectivamente, amostras mais afastadas e próximas dos ninhais. Acompanhando o aumento de P, observou-se do aumento de K, Na e Ca. A composição química total (**Tabela 2.3**) reflete a especificidade geoquímica dos sedimentos carbonáticos e seus solos derivados. As amostras apresentam teor ainda menor de sílica, e na comparação entre sedimentos e solos, ocorre um aumento de 9,18 % para 21 e 18,6 % em TS2 e TS3. Os valores de cálcio são muito elevados no sedimento, decaindo gradativamente nos solos como efeito do intemperismo que causa a dissolução dos clastos biogênicos e lixivia tal elemento. Com relação ao P total, há um aumento nas amostras dos solos em comparação com o sedimento. Esse aumento é da ordem de 0,29% da composição em TS1, para 0,615 % em TS2 e 1,353 % em TS3.

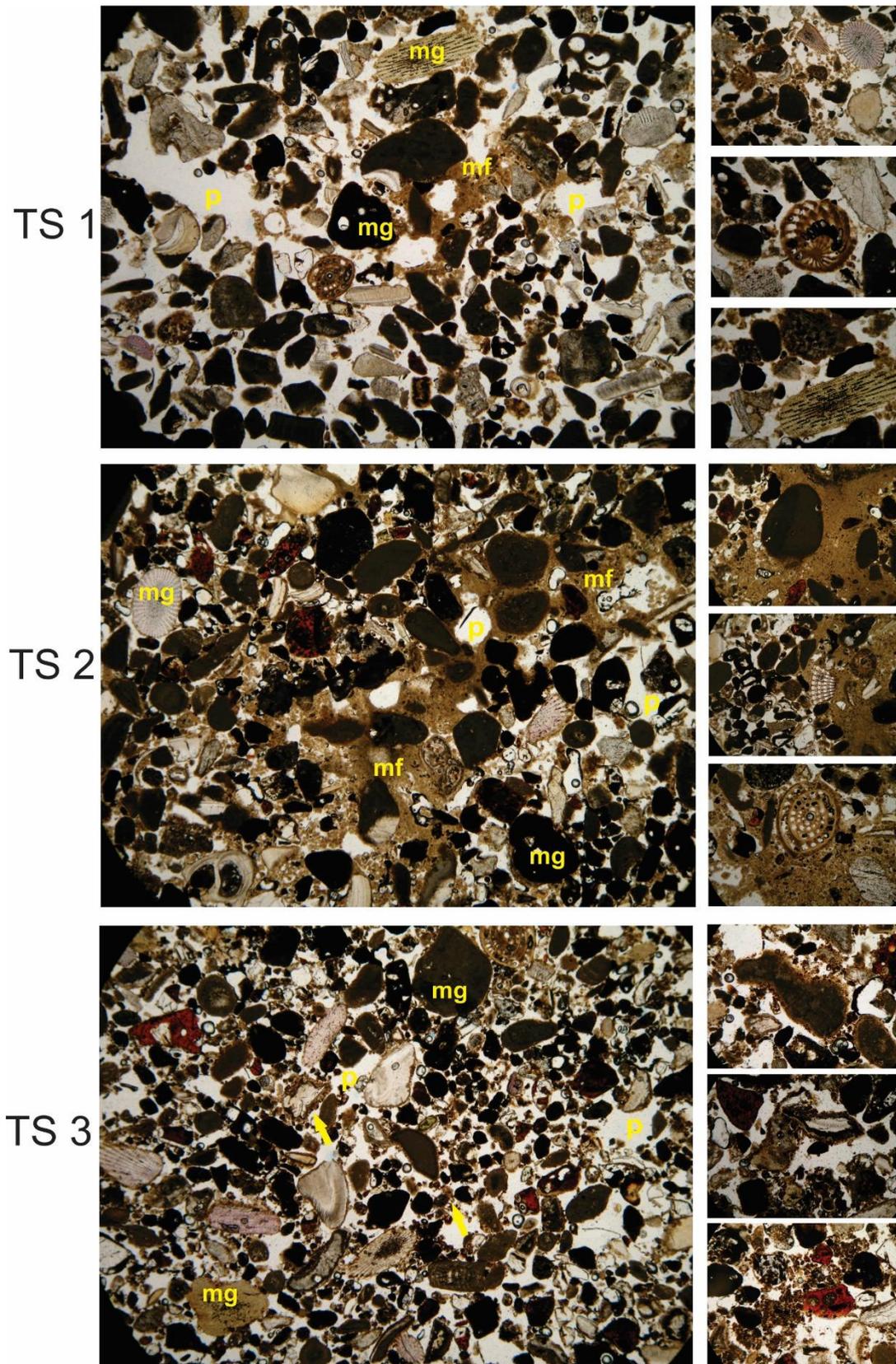
Mineralogicamente, a TFSA apresenta nos sedimentos majoritariamente carbonatos, como calcita e aragonita (**Tabela 2.3**). Foram identificados também magnetita, hematita, alunita e anfibólios. A apatita foi reconhecida na fração areia das amostras TS2 e TS3 e nas frações finas silte+argila apenas em TS3.

A microestrutura em TS1 é caracterizada por poros do tipo empacotamento simples, ocorrendo entre grãos minerais de granulometria areia grossa (**Figura 2.3**). Os constituintes não estão acomodados e os poros são totalmente interconectados, revelando a macroporosidade característica dos materiais arenosos. De maneira geral, o material é apédico, com grãos simples constituindo uma microestrutura do tipo mônica grossa em praticamente toda a lâmina. Apenas em algumas porções pode ser observado o preenchimento dos poros por uma micromassa microcristalina (cristalplasma) de coloração castanho-amarelada, com trama birrefringente do tipo cristalítica. A presença desse preenchimento caracteriza uma feição pedológica do tipo cutânica. Também são observadas feições pedológicas associadas a pelotas fecais de artrópodes, muito comuns na área de estudo.

TS2 é semelhante a TS1, possuindo, contudo, microestruturas pedogeneticamente mais desenvolvidas. Os poros são do tipo empacotamento complexo porque ocorrem tanto entre grãos minerais grossos (clastos biogênicos e minerais ferromagnesianos) quanto no interior da micromassa. Assim, existe tanto a microestrutura mônica grossa quanto uma microestrutura granular muito fracamente desenvolvida. Em algumas porções das seções delgadas, a micromassa encontra-se revestindo os grãos grossos ou formando pontes entre os mesmos, caracterizando uma distribuição relativa quito-gefúrica. Em outras porções ela preenche quase completamente os poros, reiterando sua natureza iluvial. A micromassa possui coloração castanho-amarelada e orientação cristalítica. Os minerais grossos estão visivelmente mais alterados que TS1, tanto os de natureza carbonática quanto aqueles ferromagnesianos, neste último caso bastante oxidados.

TS3 apresenta organização microestrutural semelhante aos demais, com exceção do preenchimento dos poros pela micromassa castanho-amarelada. A microestrutura é do tipo mônica grossa e os clastos encontram-se alterados nas bordas, caracterizando córtex de alteração. Em alguns clastos mais alterados, é possível perceber que o material constituído pela alteração forma a mesma micromassa observada preenchendo os poros em TS1 e TS2.

Figura 2.3 – Fotomicrografias das amostras associadas aos bioclastos carbonáticos



As imagens à esquerda possuem aumento de 2,5x no microscópio petrográfico e as demais possuem aumento de 10x. As abreviações correspondem à: p – poros; mf – material fino; mg – material grosso. As setas destacam a micromassa em TA3.

### 2.3.3 Solos associados a derrames vulcânicos de natureza alcalina

A granulometria dos solos formados a partir do kali-gauteito do Complexo Trindade apresenta certo equilíbrio na contribuição de cada fração, caracterizando em CK2 a textura franco, e em CK3 a textura franco-argilo-arenosa. Na relação silte/argila, a contribuição de silte na granulometria de CK2 é mais expressiva que em CK3. Neste caso, tais amostras evidenciam uma transformação de minerais primários, em tamanho areia e silte, em argila, sugerindo avanço na alteração dessas rochas.

Com relação ao pH em H<sub>2</sub>O, CK1 e CK2 apresentam valores próximos de 7 e 6 para o pH em KCl. Assim, o  $\Delta$ pH de CK1 corresponde a -1,29 e do CK2 a -1,43, condizente com o predomínio de cargas negativas. Em termos mineralógicos, o predomínio de cargas eletronegativas indica a presença de argilominerais.

Na composição química do complexo sortivo, os resultados apontam solos bastante férteis, com altos valores de saturação por bases e de CTC. A saturação por alumínio foi nula e a acidez potencial muito baixa. Baixos também são os valores de matéria orgânica, não ultrapassando 1 dag/Kg. A amostra CK2 apresentou caráter solódico, ao passo que a amostra CK3 possui caráter sódico, dada sua elevada saturação por sódio (**Tabela 2.2**). Tais amostras encontram sob efeito de sprays salinos, bem como são derivadas de materiais de vulcanismo fortemente saturado em Na<sub>2</sub>O (ALMEIDA, 1961). Sobre o conteúdo de P trocável, ambas as amostras (CK2 e CK3) apresentaram valores elevados, respectivamente de 672,1 e 987,6 mg/dm<sup>3</sup>.

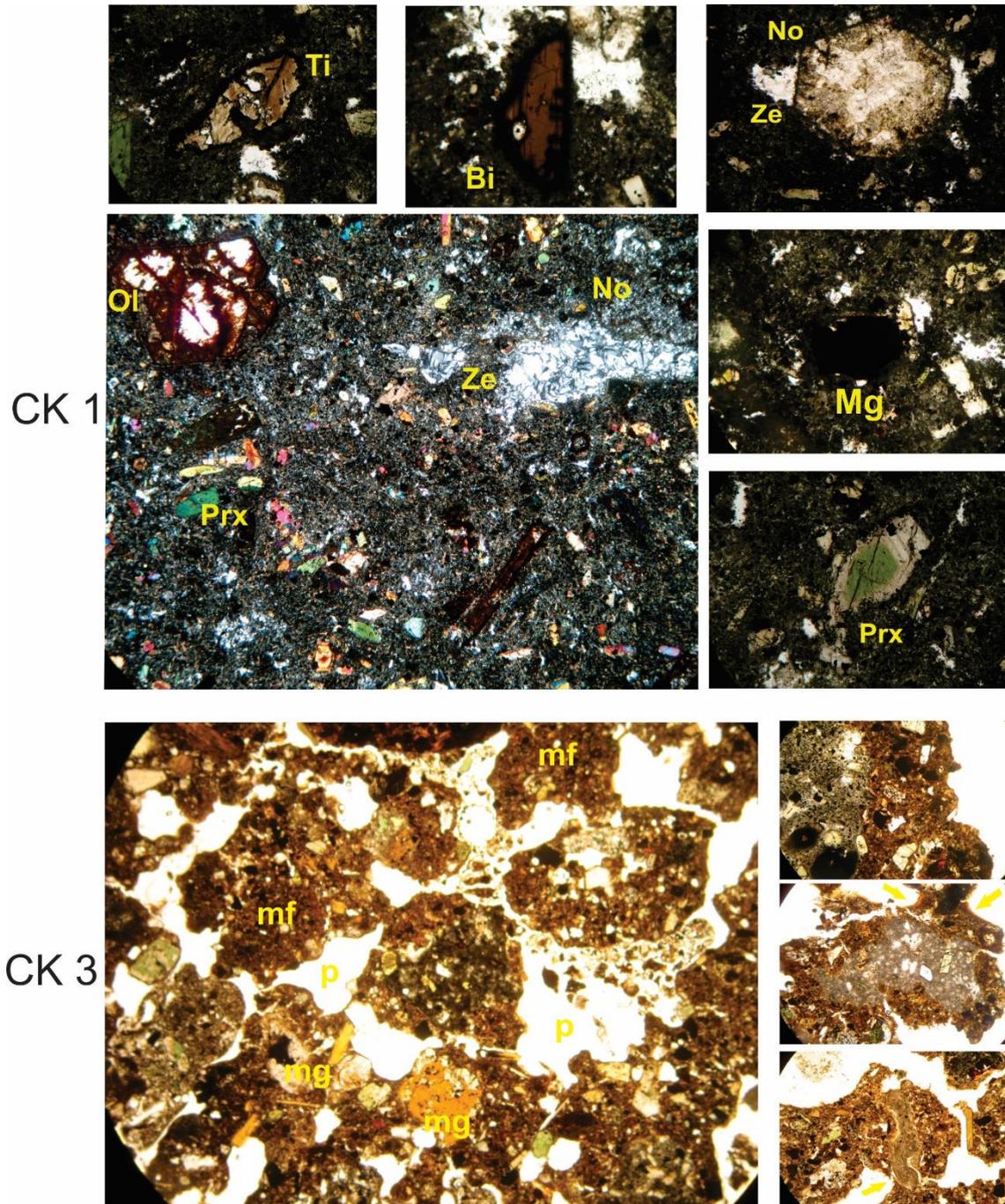
O conteúdo total de sílica é pouco elevado (**Tabela 2.3**), com decréscimo na comparação entre a rocha e os solos dela originados. Também na comparação da rocha com o solo há um ligeiro aumento no conteúdo de alumínio e ferro, e um decréscimo, mesmo que sutil, no conteúdo de cálcio. O conteúdo de alumínio das rochas de vulcanismo alcalino é superior aquele encontrado nas demais rochas da Ilha, sendo os seus solos possíveis portadores de formas minerais secundárias contendo Al em sua composição. Em relação ao fósforo, os resultados da FRX apresentam um aumento na comparação entre CK1, CK2 e CK3, respectivamente de 0,895 para 1,328 e 1,679 %.

Mineralogicamente, as análises de DRX indicaram que o Kali-gauteito é constituído por noseana, piroxênio (soda augita), mica (biotita), titanita, anfibólios e magnetita (**Tabela 2.3**). Essa mineralogia é corroborada pela análise micropetrográfica. O Kali-gauteito é uma rocha fonolítica (ANTONELLO *et al.*, 2009), de coloração variando entre cinza claro a cinza esverdeado, com natureza alcalina básica extrusiva porfirítica. Assim, os principais minerais que podem ser identificados em nível microscópico são noseanas, magnetitas, biotitas, olivinas, zeolitas, titanitas e clinopiroxênios (**Figura 2.4**). Possui matriz fina, microcristalina e vesicular, com preenchimento de noseanas hipidiomórficas e zeolitas pós magmática. Há predominância de fenocristais de piroxênios zonados com centro esverdeado e bordas mais esbranquiçadas, indicando diferenças na concentração de ferro. Ocorrem ainda fenocristais de titanita hipidiomórfica e olivinas, sendo que esta última encontra-se em variados estágios de alteração para indigita. Assim como no ankartrito, a apatita é mineral acessório, sendo encontrada principalmente na matriz. Alguns cristais de biotita apresentam bordas corroídas.

A mineralogia das amostras CK2 e CK3 é semelhantes à rocha, com muitos minerais primários inclusive nas frações silte+argila. A apatita aparece apenas na rocha e na TFSA da amostra CK3. Há uma suposta presença de caulinita na fração silte+argila, mas com picos muito disformes e que necessita de maiores estudos para ser confirmada. Micromorfológicamente, essas amostras apresentam mesma organização estrutural. A microestrutura é do tipo blocos subangulares moderadamente desenvolvidos com poros planares e cavidades irregulares ao redor dos agregados. O fundo matricial é constituído por grãos grossos de noseana, piroxênios, olivinas e magnetita, quase sempre representando os fenocristais da rocha. Existem fragmentos alteromorfizados indicando a jovialidade dos processos de alteração, embora tais fragmentos líticos estejam dispersos e desorganizados, sugerindo que houve movimentação do material a partir da erosão (colúvio) de antigos níveis isalteríticos. A micromassa tem sua origem relacionada, principalmente, à degradação da matriz e possui coloração bruno-amarelada, contrastando com tons aczentados da matriz do kali gauteíto. A trama birrefringente na micromassa é do tipo indiferenciada. São observadas feições pedológicas de

preenchimentos, como cutãs iluviais de coloração vermelho-amarelada a amarelo-acinzentado. A matéria orgânica é observada na forma de pontuações na matriz.

**Figura 2.4** – Fotomicrografias das amostras associadas ao vulcanismo alcalino



As imagem à esquerda possuem aumento de 2,5x no microscópio petrográfico e as demais possuem aumento de 10x. A imagem central de CK1 está sob nícois cruzados. As abreviaturas correspondem à: Prx – piroxênio; No – noseana; Ze – zeólita; Ol – olivina; Ti – titanita; Bi – biotita; Mg – magnetita; p – poros; mf – material fino; mg – material grosseiro. As setas destacam feições pedológicas do tipo cutãs iluviais.

## 2.4 Discussão

Os resultados obtidos sugerem que os solos, independente do material de origem, têm sido afetados pelos excrementos das aves através da transformação geoquímica do complexo sortivo e da composição mineralógica. No primeiro caso, dentre as transformações mais relevantes observadas, está o enriquecimento absoluto em diversas bases, mas com expressivo destaque para o fósforo e o cálcio, explicado pelo aporte destes elementos na dieta das aves migratórias (BOTH & FREITAS, 2001) e, por isso, constituindo seus excrementos. Em se tratando das transformações mineralógicas associadas à atividade da avifauna, os resultados revelaram que a principal influência tem sido a incorporação de minerais biogênicos, como apatita de osso, igualmente rica em P e Ca. Como o enriquecimento geoquímico e mineral em P é de interesse nas pesquisas sobre solos de ilhas oceânicas, ele será mais detalhadamente discutido adiante.

Ainda que com intensidade bem inferior ao que é observado em outras ilhas oceânicas e na Antártica, é possível considerar que os solos nas áreas afetadas por ninhais em Trindade foram fosfatizados. Simas *et al.* (2007) argumentam a eficiência da utilização do método de extração de P pelo Mehlich-1 como indicador preliminar de solos ornitogênicos, permitindo a comparação do teor de P de solos submetidos ou não à influência da avifauna. Tais autores propõem o valor de 500 mg/dm<sup>3</sup> para a identificação de solos ornitogênicos, o que foi atendido pelas amostras TA3, TS3 e CK2 e CK3.

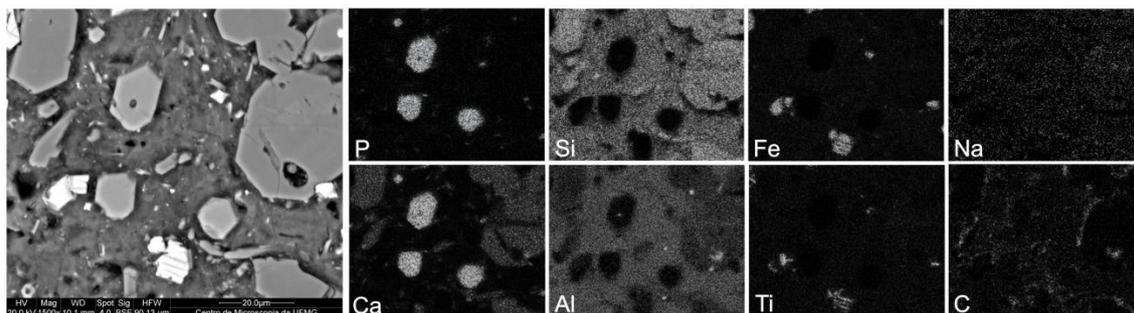
A presença de fósforo em Trindade, entretanto, não ocorre apenas pela inserção ornitogênica, já que a apatita é identificada como mineral acessório em algumas rochas (ANTONELLO *et al.*, 2009). Contudo, caso houvesse ocorrido somente o intemperismo das rochas que contém esses minerais, sem a influência da avifauna, a tendência seria para sua perda por lixiviação, reduzindo os valores na comparação entre o material de origem e o solo derivado. Os resultados da análise química total demonstram o contrário. Ainda assim, a distinção entre o P de origem geogênica e aquele biogênico é importante para a confirmação da presença de solos fosfatizados, bem como

para elucidar como as formas de P inseridas pela avifauna encontram-se nos solos.

Na comparação entre a constituição química total e parcial (rotina), tendo a amostra CK como exemplo, os teores de fósforo adsorvido em CK2 e CK3 convertidos de  $\text{mg/dm}^3$  para %, foram, respectivamente, 0,67 e 0,98%. Nessas mesmas amostras os teores totais foram de 1,3 e 1,6%. Isso dá a dimensão que o fósforo presente se encontra majoritariamente na forma lábil e que o restante pode estar na estrutura de minerais ou constituindo materiais amorfos. Buscando identificar essas formas minerais cristalinas, foi realizada a análise de DRX, a partir da qual apenas a apatita foi constatada e, ainda assim, com picos de baixa intensidade. Em outros estudos, diversas formas minerais fosfáticas são apontadas, como taranakita, variscita, minyulita, leucofosfita e estruvita (TATUR & MYRCHA, 1984; SCHAEFER *et al.*, 2004; SIMAS *et al.*, 2006; PEREIRA *et al.*, 2013). Mesmo que seja relatada pela literatura uma dificuldade de identificação desses minerais, sobretudo porque em sua maioria estão presentes na forma criptocristalina (KARAKANAS & GOLDBERG, 2010), os resultados sugerem que a fosfatização dos solos em Trindade tem levado, principalmente, a uma transformação do complexo sortivo, com menor influência na mineralização.

Para o reconhecimento de tais formas de fosfato, é apresentada a análise de imagens retroespalhadas acompanhadas por mapeamentos microquímicos com a sonda EDS. A presença de minerais fosfáticos associados ao cálcio (apatita de origem geogênica) no domínio dos fragmentos litorreliquiais foi confirmada, estando os cristais como inclusões nos minerais ferromagnesianos ou na matriz aluminossilicática (**Figura 2.5**). No domínio do solo, destaca-se igualmente a presença de Ca-P, na forma de: fragmentos residuais de apatita de osso (**Figura 2.6**), Ca-P iluviais e Ca-P reativos (**Figura 2.7**).

**Figura 2.5** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos com a presença de cristais hexagonais de apatita numa matriz aluminossilicática. Amostra de kauli-gauteíto (CK1).

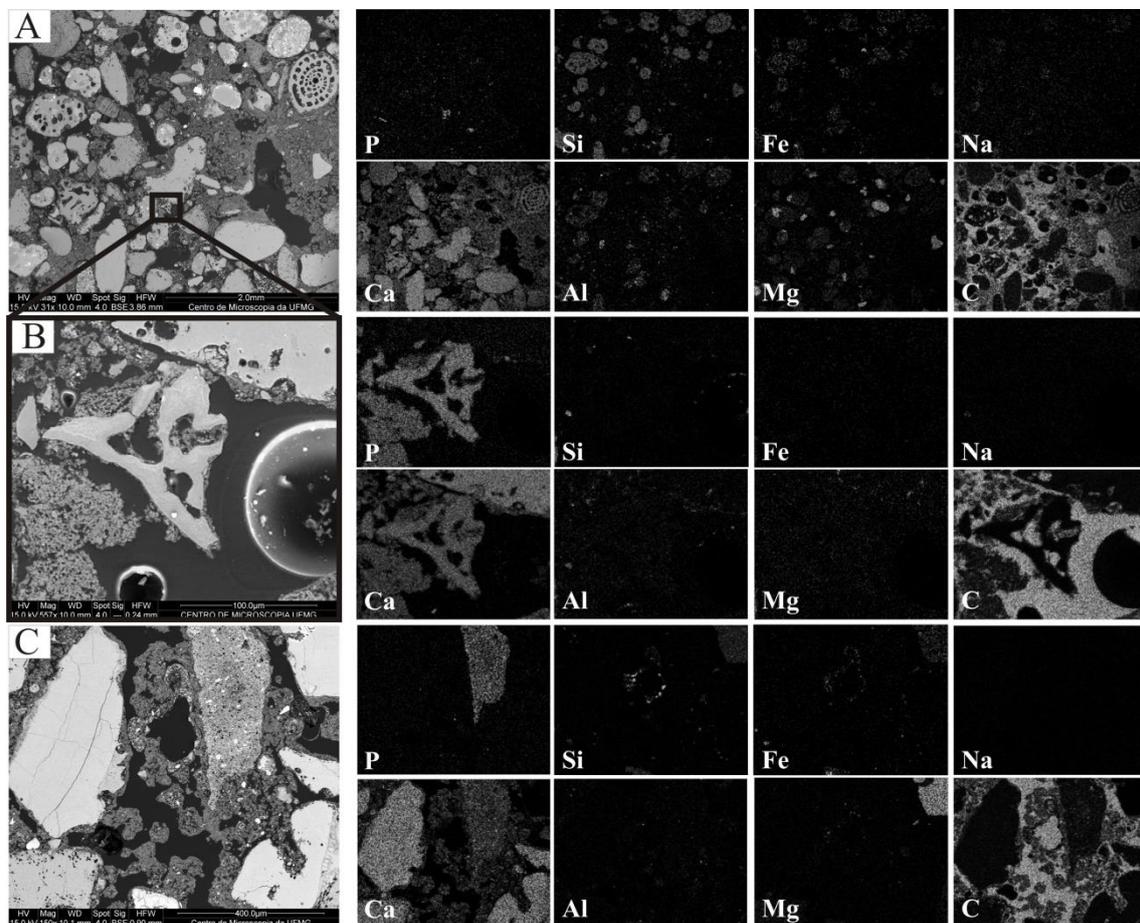


Os fragmentos de apatita de osso estão em graus de alteração variáveis (**Figuras 2.6 B e C**) e podem juntamente com a apatita mineral serem responsáveis pelos picos observados nos difratogramas. Foram encontrados principalmente nos sedimentos bioclastico-carbonáticos e, em menor proporção, nas amostras associadas ao vulcanismo básico. Os ossos dos animais vertebrados são constituídos por moléculas de colágeno ligadas em cadeias lineares arranjadas em fibras (GUASTALDI & APARECIDA, 2010). Entre tais moléculas há pequenos espaços ocupados por sólidos inorgânicos que possuem composição e padrão de difração de raios-x semelhantes ao composto de fosfato de cálcio, sendo muito comparados às hidroxiapatitas. Embora o intemperismo desses cristais possa ocorrer no próprio trato digestivo das aves, eles constituem cerca de 65% da composição do osso e, por isso, uma quantidade considerável pode ser eliminada nos excrementos.

As formas de Ca-P de reação (**Figuras 2.7 A e B**) e iluviais (**Figuras 2.7 C e D**) são amorfas e representam a interação dos excrementos com os constituintes grossos e finos do solo. No primeiro caso, foram reconhecidos fosfatos associados a Ca nas bordas de fragmentos litorreliquiais de escórias de vidro vulcânico. Simas et al., (2007) sinalizaram que o P ornitogênico reaja primeiro com aluminossilicatos e ferromagnesianos amorfos, devido sua superfície específica e alta afinidade reativa com o fósforo. Assim, forma-se um córtex de alteração e, embora tais rochas básicas contenham ferro e alumínio em sua composição, não foram identificadas formas minerais de Al-Fe-P. Da mesma maneira, em algumas vesículas e impregnada na sua micromassa,

ocorre a associação Ca-P. Essas feições são discretas e foram observadas apenas nas amostras associadas às rochas alcalinas. Simas *et al.* (2007) reportaram a presença de fosfatos iluviais em solos da Antártica e, de acordo com esses autores, são feições presentes ao longo das linhas de clivagem de minerais, de fragmentos de rochas crioturbadadas ou entre agregados. Nas amostras associadas aos sedimentos bioclástico-carbonáticos também foi identificada a presença de material iluvial entre os fragmentos de areia carbonática, sendo revelado pelos mapas microquímicos, contudo, parece ser uma micromassa cristalítica de composição carbonática (**Figura 2.6A**), proveniente da degradação dos próprios clastos. Imagens de elétrons retroespalhados confirmam esses diferentes graus de degradação, na medida em que permitem observar variações texturais decorrentes das variações composicionais desses materiais.

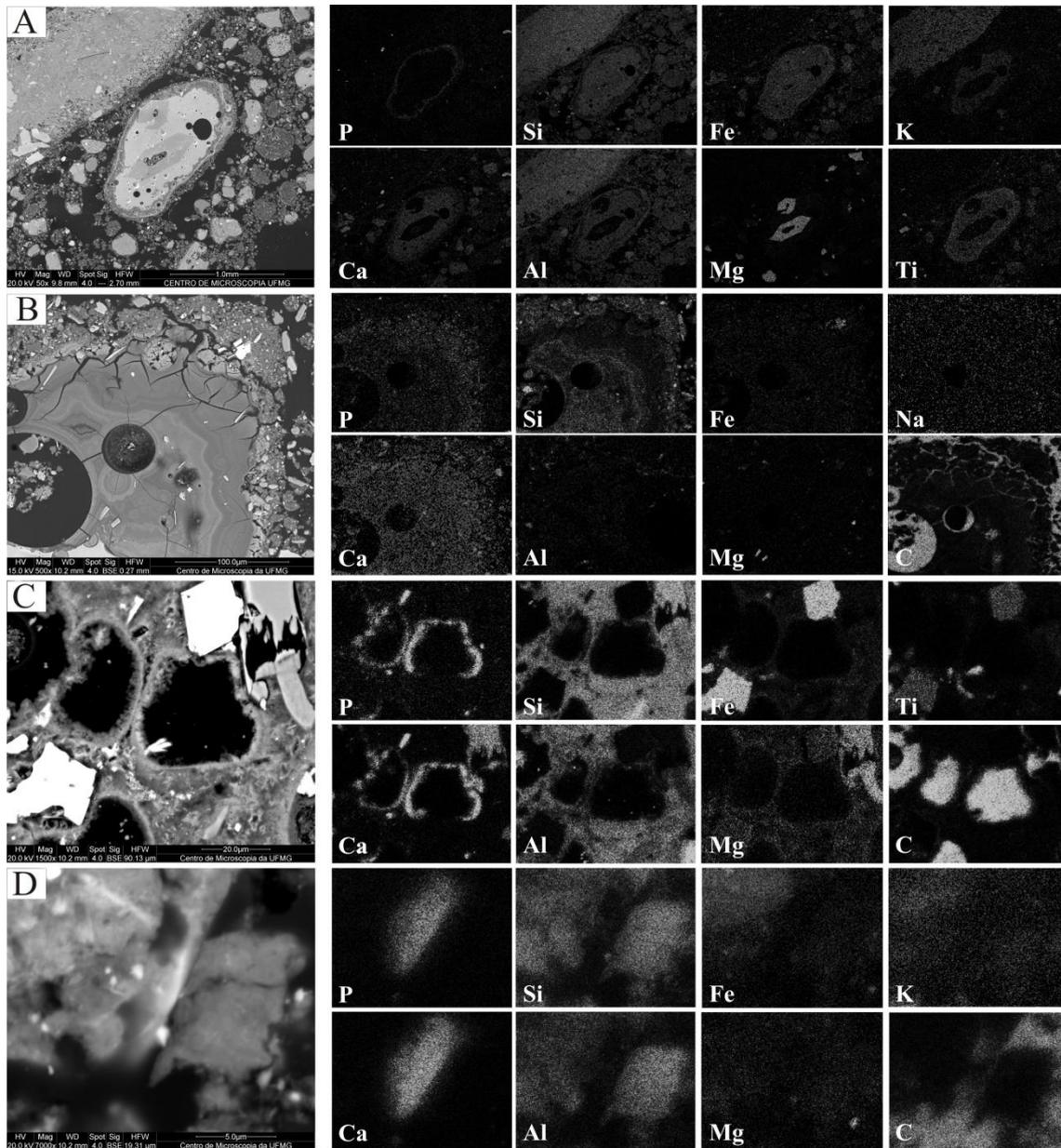
**Figura 2.6** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (feições claras indicam a presença do elemento químico) destacando: A, B e C) presença de fragmentos de apatita de osso em distintos graus de degradação entre sedimentos bioclásticos e micromassa carbonática.



Conforme Myrcha & Tatur (1991), o avanço da atividade microbiológica associada à decomposição da matéria orgânica do guano provoca o processo de nitrificação, que é capaz de acidificar o meio, intemperizar minerais primários, e formar espécies secundárias associadas ao fósforo presente. Esse processo é dependente do tempo e, por isso, os solos mais ácidos e com espécies minerais mais diversificadas são aqueles de colonização biológica mais antiga. Ao contrário, quando a colonização biológica é recente, ou há menor quantidade de excrementos depositada, o meio permanece alcalino, sendo comum a presença do fósforo como ácido ortofosfórico -  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$  (LINDSAY, 1979). Nas condições alcalinas, as formas de fósforo associada ao cálcio são mais estáveis e, por isso, não somente fragmentos de apatita biogênica podem ser mantidos, mas também a formação de fases amorfas de Ca-P é mais comum.

Nos termos acima expostos, uma primeira análise poderia levar ao entendimento de que a fosfatização na Ilha da Trindade sinaliza para uma ocupação recente. Entretanto, no contexto de paisagem em que as amostras foram coletadas, os resultados aqui encontrados sugerem muito mais uma fosfatização indireta. Isto é, as amostras analisadas neste estudo situam-se em talus das bordas de necks fonolíticos, onde os ninhais são majoritariamente verificados. A deposição dos excrementos ocorre principalmente e diretamente sobre as rochas. As bordas por sua vez, receberão a colonização intermitente de aves ou, o que parece ser o mais comum, soluções diluídas pela água da chuva que escoam sobre as rochas contendo íons dissolvidos, sedimentos ou fragmentos rochosos por erosão de blocos. Assim, o aporte destes é menor que aquele depositado *in situ* e parece não envolver as reações de decomposição da matéria orgânica que acidificam os solos. Haveria, nesse contexto, uma relação não só com o tempo de nidificação e com os materiais do substrato, mas também com uma dinâmica de transporte de material associada a dinâmica geomorfológica (destaque para os processos erosivos geoquímicos e mecânicos).

**Figura 2.7** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (feições claras indicam a presença do elemento químico) destacando: A e B) córtex de Ca-P reativo em fragmentos de escoria de vidro vulcânico em solos de rocha vulcânica básica; C) Ca-P iluvial em vesículas de fragmento de rocha vulcânica alcalina e D) micromassa impregnada por Ca-P em amostra de solo de rocha vulcânica alcalina.



## 2.5 Considerações Finais

A espacialidade dos solos associada às relações edáficas identificadas em campo e utilizadas para a sistematização da coleta dos materiais influenciados e não influenciados pela avifauna se mostraram eficazes, tendo os resultados refletido claramente tal influência.

A dinâmica geomorfológica através dos processos de erosão parece ter um significado especial para a compreensão da maneira como os excrementos das aves afetam os solos na Ilha.

A principal transformação observada nos solos pela interação com os excrementos foi a acumulação absoluta de cátions no complexo sortivo e de minerais biogênicos não degradados. Como em ambos existe uma quantidade expressiva de P, é possível considerar uma fosfatização dos solos afetados pela nidificação.

Um cuidado especial deve ser tomado para a distinção entre as formas de Ca-P de origem geogênica, expressas por minerais de apatita nas rochas, com as formas associadas à atividades biológica, como fragmentos de apatita de osso, e fosfatos amorfos reagindo incipientemente com fragmentos líticos ou impregnando porções da micromassa. Isso porque, independente da origem, ocorre sempre a associação Ca-P, sendo necessárias a realização de análises microquímicas para essa diferenciação.

Apesar de ocorrer indiscriminadamente nos mais diversos materiais, a influência dos distintos tipos de rochas na fosfatização parece ocorrer na maior retenção (ou não) das soluções que contém fósforo, mesmo que diluídas, ou no fósforo liberado pela degradação *in situ* de fontes ornitogênicas (ossos, por exemplo). Enquanto nos solos derivados de rochas vulcânicas a fosfatização atua/reage com os constituintes presentes, e pode levar à interação entre eles, nos solos derivados dos bioclastos a solução fosfática parece ser facilmente perdida e apenas fragmentos foram observados. O sistema parece não permitir a retenção do P por causa da drenagem muito eficiente.

Novos investimentos devem ser feitos para compreender como efetivamente se distribuem as áreas fosfatizadas na paisagem da Ilha da Trindade e se, de algum modo, tem sido suficiente para promover transformações mineralógicas mais intensas (neofomações de fosfatos) ou morfológicas (agregados fosfáticos), já que este estudo assume um caráter preliminar diante do volume de amostras e áreas abrangidas. Como a dinâmica de movimentação de materiais (físicos e em solução) parece exercer um papel relevante, seria

importante que nesses investimentos futuros, o posicionamento das amostras em distintos compartimentos geomorfológicos fosse considerado.

## 2.6 Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M. Geologia e Petrologia da ilha da Trindade. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1961, 197p.

\_\_\_\_\_. Petrologia da Ilha da Trindade. Tese para concurso à cátedra da USP. São Paulo, 1962, 223p.

\_\_\_\_\_. Ilhas oceânicas brasileiras e sua relação com a tectônica atlântica. *Terræ Didactica*, 2(1): 3-18, 2006.

ALMEIDA, B. G. D. E., DONAGEMMA, G. K., RUIZ, H. A., BRAIDA, J. A., VIANA, J. H. M., REICHERT, J. M. M., OLIVEIRA, L. B., CEDDIA, M. B., WADT, P. S., FERNANDES, R. B. A., PASSOS, R. R., DECHEN, S. C. F., KLEIN, V. A., TEIXEIRA, W. G. Comunicado Técnico 66: Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil. Embrapa. Rio de Janeiro, 2012, 11p.

ALVAREZ, V. H., NOVAIS, R. F., BARROS, N. F., CANTARUTTI, R. B., LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ, V. H. (eds.). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999, p.25-32.

ALVES, R. J. V. Ilha da Trindade & Arquipélago Martin Vaz – um ensaio geobotânico. 144p. Serviço de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1998.

ANTONELLO, L. L.; ZUCOLOTTO, M. E.; CASTRO, J. W. A. Microscopia de rochas da coleção de petrografia do Museu Nacional / UFRJ: Ilha da Trindade, Brasil. In: MOHR, L. V., CASTRO, J. W. A., COSTA, P. M. S., ALVES, R. J. V. (Eds.) Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. Brasília. Ministério do Meio Ambiente. p. 105-124, 2009.

BOCKHEIM, J. G. Soil endemism and its relation to soil formation theory. In: *Geoderma*, 129:109-124. 2005.

BOTH, R.; FREITAS, T.R.O. A dieta da *Sula leucogaster*, *Anous stolidus* e *Anous minutus* no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil. In.: ALBUQUERQUE, J. B.; CANDIDO JUNIOR, F. C.; ROSS, A. L. (Eds). *Ornitologia e Conservação: da ciência às estratégias*. Tubarão. Ed. Unisul. 2001. pp. 313-337.

BRINDLEY, G. W.; BROWN, G. *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification (Monograph 5)*. Min. Soc., London, 1980, 495p.

CASTRO, J. W. A., ANTONELLO, L. L. Geologia das ilhas oceânicas brasileiras. In: Alves, R. J. V., CASTRO, J. W. A. (Eds.) *Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo*. Brasília. Ministério do Meio Ambiente. 2006, p. 29-57.

CLEMENTE, E. C. Ambientes terrestres da Ilha da Trindade, Atlântico Sul: caracterização do solo e do meio físico como subsídio para a criação e uma unidade de conservação. Doutorado (tese do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. 2006, 167p.

CLEMENTE, E. P.; SCHAEFER, C. E.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; ALVES, R. J & MELO, V. S. Solos “endêmicos” da Ilha da Trindade. In: ALVES, R. J. & CASTRO, J.W.C. org. *Ilhas oceânicas brasileiras – Da pesquisa ao manejo*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente. 2006, p.59-82.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3 ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2013, 353p.

FISCHER, W. R., SCHWERTMANN, U. The formation of hematite from amorphous iron(III) hydroxide: *Clays & Clay Minerals* 23, 33-37. 1975.

FONSECA, NETO, F. P. Aves marinhas da ilha Trindade. In: BRANCO, J. O. (org.) Aves marinhas insulares brasileiras: bioecologia e conservação. Editora da UNIVALI, Itajaí, SC, 2004, p.119-146.

GUASTALDI, A. C.; APARECIDA, A. H. Fosfatos de cálcio de interesse biológico: importância como biomateriais, propriedades e métodos de obtenção de recobrimentos. Química Nova, 33, 6, 2010.

KARKANAS, P.; GOLDBER, P. Phosphatic features. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, 2010, p.521-541.

LINDSAY, W. L. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, New York. 1979, 449p.

MARQUES, F. A., RIBEIRO, M. R., BRITTAR, S. M. B., TAVARES FILHO, A. N., LIMA, J. F. W. F. Caracterização e classificação de Neossolos da ilha de Fernando de Noronha (PE). Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31:1553-1562, 2007.

MYRCHA, A., PIETR, S.J., TATUR, A. The role of Pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), Antarctic nutrient cycles and food webs. Springer-Verlag, Berlin, p. 156-163, 1985.

MYRCHA, A., TATUR, A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. Polish Polar Research, 12, 1:3-24, 1991.

OLIVEIRA, F. S. Fosfatização em solo e rocha em ilhas oceânicas. Mestrado (dissertação do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. 2008, 115p.

OLIVEIRA, F. S., ABRAHÃO, W. A. P., SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(2): 239-246, 2010.

OLIVEIRA, F. S., SCHAEFER, C. E. G. R., ABRAHÃO, W. A. P., CLEMENTE, E. P., SIMAS, F. N. B. Soil-geomorphology interactions and paleoclimatic implications of an ornithogenic soil toposequence on Rata Island, Fernando de Noronha Archipelago, South Atlantic. *Journal of South American Earth Sciences*, 52:119-128, 2014.

PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, I. C. C. Micromorphological and microchemical indicators of pedogenesis in ornithogenic cryosols (gelisols) of Hope Bay, Antarctic Peninsula. *Geoderma*, 193-194, 311-322, 2013.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; CORREA, M. M.; COSTA, L. M.; PARAHYBA, R. B. V.; GUERRA, S. M. S.; HECK, R. Topolitossequências de solos no Alto Paranaíba: atributos físicos, químicos e mineralógicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 33:1795-1809, 2009.

SÁ, M. M. F. Caracterização ambiental, classificação e mapeamento dos solos da ilha da Trindade, Atlântico Sul. Mestrado (Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, 2010, 58 p.

SEDOV, S., STOOPS, G., SHOBA, S. Regoliths and soils on volcanic ash. In: In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, 2010, p. 275-303.

SCHAEFER, C.E.G.R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R., MICHEL, R.F.M., VIANA, J.H.M., TATUR, A. Fosfatização: processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: SCHAEFER, C.E.G.R., FRANCELINO, R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE FILHO, R. (eds.), *Ecosistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT e Departamento de Solos, Viçosa, 2004, p.47-59.

SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B., ALBUQUERQUE, M. A., SOUZA, E., DELPUPO, K. K. Fosfatização de solos e evolução da paisagem no

arquipélago de Abrolhos, BA. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(4): 727-734, 2010.

SIMAS, F. N. B., SCHAEFER, C. E. G. R., MELO, V. F., GUERRA, M. B. B., SAUNDERS, M., GILKES, R. J. Clay-sized minerals in permafrost-affected soils (Cryosols) from King George Island, Antarctica. *Clays and Clay Minerals* 54, 721-736, 2006.

SIMAS, F. N. B., SCHAEFER, C. E. G. R., MELO, V. F., ALBUQUERQUE-FILHO, M. R., MICHEL, R. F. M., PEREIRA, V. V., GOMES, M. R. M., COSTA, L. M. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process. *Geoderma*, 138: 191-203, 2007.

STOOPS, G. Guidelines for the analysis and description of soil and regolith thin sections. SSSA. Madison, WI. 2003.

STOOPS, G. Micromorphology of soils derived from volcanic ash in Europe. A review and synthesis. *European Journal Soil Science*, 58:356-377, 2007.

STOOPS, G., VALVOULIDOU, E., MONTEIRO, F. Micropedology, mineralogy and biology of soils derived from volcanic ash on Santorini (Greece). *Geophysical Research Abstracts*, Volume 8, EDU06-A-10388, 2006.

STOOPS, G., GÉRARD, M., ARNALDS, O. A micromorphological study of Andosol genesis in Iceland. In: KAPUR, S., MERMUT, A., STOOPS, G. (eds.), *New Trends in Micromorphology*. Springer-Berlag, Berlin, 2007, p.67-90.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime antarctic. *Polish Polar Research* 4, 481–532, 1989.

TATUR, A., BARCZUK, A. Ornithogenic phosphates on King George Island, Maritime Antarctic. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), *Antarctic nutrient cycles and food webs*. Springer-Verlag, Berlin, 1985, p. 163-169.

TATUR A., MYRCHA A. Ornithogenic soils on King George Island (maritime Antarctic zone). *Polish Polar Research*, 5:31-60, 1984.

WALTER, H. S. The mismeasure of islands: implications for biogeographical theory and the conservation of nature. *Journal of Biogeography*, 31, 177-197, 2004.

## CAPÍTULO 2 – ROCHAS AFETADAS PELA DEPOSIÇÃO DE EXCREMENTOS DE AVES NA ILHA DA TRINDADE, ATLÂNTICO SUL

### 3.1 Introdução

Com gênese associada à influência de um *hot spot* sobre uma zona de fraturas da Placa Sul-Americana, a Ilha da Trindade (Atlântico Sul) surgiu no Cenozoico há aproximados três milhões de anos AP e seu último episódio vulcânico é posterior à última glaciação holocênica (ALMEIDA, 2006). Apesar dos depósitos litorâneos e fluvio-coluviais, toda a ilha é formada por materiais vulcânicos, incluindo derrames, eruptivas intrusivas e piroclastos variados (ALMEIDA, 1962). São reconhecidas cinco formações na Ilha: Complexo Trindade, Sequência Desejado, Formação Morro Vermelho, Formação Valado e Formação Vulcão do Paredão. À exceção do último, que é de composição básica, os demais grupos litológicos constituem séries alcalinas, subsaturadas em sílica, com constituição de caráter sódico e alumínico que garantem uma mineralogia diversificada, incluindo feldspatos potássicos, feldspatóides, anfibólios, piroxênios, biotitas e olivinas (ALMEIDA, 1962; ANTONELLO *et al.*, 2009).

Sobre essa complexa variedade de rochas, diversas espécies de aves marinhas fazem seus ninhais. Entre espécies residentes e migratórias, Fonseca Neto (2004) estimou que cerca de 12000 aves nidificam em Trindade, preferencialmente sob o substrato rochoso, nos espaços entre cavidades e fraturas dos neks e domos fonolíticos e entre os depósitos de tálus que se espalham nos sopés dos afloramentos rochosos. Ao estabelecer a área de nidificação, essas aves excretam uma solução semi sólida de ácido úrico (uma substância estável e insolúvel), rica em N, P, Ca, K, Na e Mg, que pode se acumular em quantidades suficientes para se constituírem um depósito geoquimicamente significativo, chamado guano. Esse excremento tende a reagir de maneiras específicas com o substrato com o qual está em contato (HUTCHINSON, 1950; ANDERSON & POLIS, 1999).

Uma das reações a ser destacada é a alteração intempérica, capaz de transformar parcialmente ou totalmente as rochas, gerando materiais que são morfológica, química e mineralogicamente diferentes dessas. Tais mudanças são consequência da transformação dos minerais originais e sua possível substituição por minerais cristalinos ou amorfos secundários (DELVIGNE, 1999). As reações físico-químicas responsáveis pelo intemperismo envolvem o contato com a solução aquosa contendo íons ou coloides dissolvidos, que penetram nas rochas aproveitando linhas de fraqueza. Em condições geoquímicas específicas, como as provenientes da interação excremento-rocha, é possível a formação de fases minerais secundárias constituídas por carbonatos, sulfatos, nitratos, fosfatos, entre outros (IRICK et al., 2015), pouco comuns no intemperismo laterítico característico das regiões tropicais, onde predomina a formação de fases minerais silico-aluminosas e ferruginosas (NAHON, 1991). Muitas vezes os produtos da alteração dessas rochas evoluem para solos, conhecidos como ornitogênicos. Na Antártica, o intemperismo promovido pela interação excremento-rochas é tido como um dos mais importantes para a transformação das rochas, dada as condições desfavoráveis à alteração hidrolítica.

Em alguns casos, além de alteritas e solos, a interação entre os excrementos de aves e as rochas é responsável por formar feições características nas rochas, que incluem revestimentos e preenchimentos. Essas feições já foram identificadas por diversos estudos em áreas afetadas pela nidificação, destacando Tatur (1989) na Antártica, Oliveira *et al.* (2010) e Smith *et al.* (2012) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo e por Landis & Craw (2010) em ilhas neozelandesas.

No caso específico da Ilha da Trindade, embora tenha sido registrada a presença de contingente significativo de aves, os produtos da interação entre os excrementos e o substrato rochoso, considerando sua diversidade litológica, nunca foram estudados, permanecendo desconhecidas as características das possíveis transformações envolvidas. A partir disso, o objetivo deste estudo foi identificar se rochas situadas em áreas nidificadas têm sido afetadas por tal nidificação e como isso ocorreria, traduzido através de um estudo petrográfico das características macro e micromorfológicas das feições reconhecidas.

## 3.2 Materiais e métodos

### 3.2.1 Área de estudo, coleta e preparo de amostras

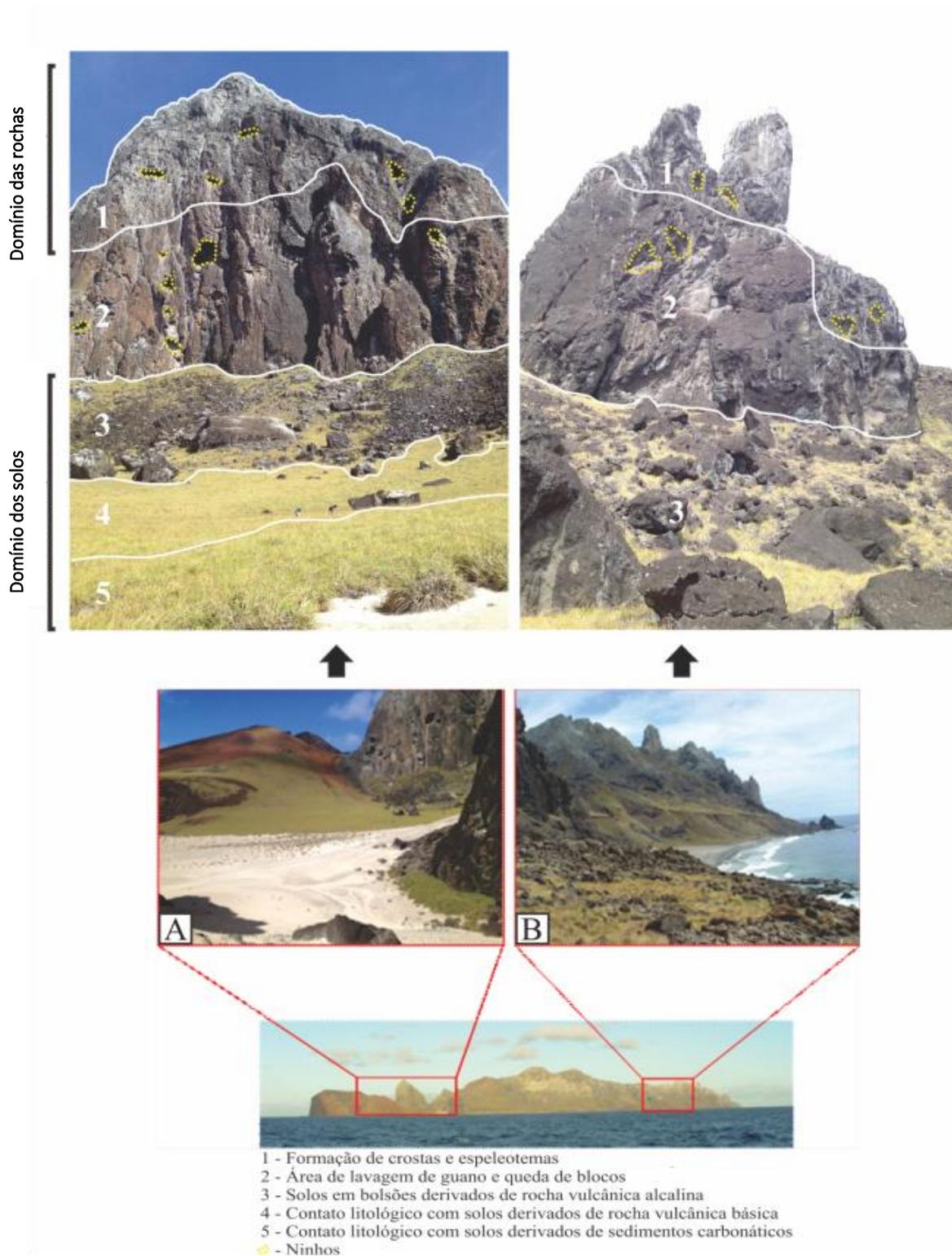
O reconhecimento das possíveis transformações e feições relacionadas à interação dos excrementos com o substrato rochoso em Trindade foi realizado pelo estudo petrográfico em escala macro e microscópica. Previamente, em gabinete, foram selecionadas as principais áreas de nidificação na Ilha conforme os estudos de Fonseca Neto (2004), Clemente (2006) e Sá (2010), correlacionando com a geologia da Ilha a partir dos estudos de Almeida (1962). Em campo, essas áreas foram visitadas para reconhecimento prévio, e com base nesse foram selecionados dois pontos nas extremidades da costa nordeste, próximas às praias das Tartarugas e Cabritas (**Figura 3.1**).

Na Praia das Tartarugas existem tanto rochas vulcânicas básicas da Formação Vulcão do Paredão (**Figura 3.1A**), especificamente na porção sul do cone de vulcão homônimo (ALMEIDA, 1961; 1962; CASTRO & ANTONELLO, 2006), quanto rochas vulcânicas alcalinas nos necks fonolíticos do Pico do Vigia e Pão de Açúcar, além de depósitos de tálus associados. Na Praia das Cabritas (**Figura 3.1B**), por sua vez, predominam rochas vulcânicas alcalinas, majoritariamente pertencentes ao Complexo Trindade. Em ambas, a presença de ninhais é notória, bem como os afloramentos rochosos encontram-se visualmente cobertos por excrementos. A partir disso, foram coletadas aproximadamente 15 amostras<sup>7</sup> na Praia das Cabritas e 33 amostras na Praia das Tartarugas, agrupadas conforme a unidade geológica em que se situam. As coletas foram realizadas sempre considerando a presença de excremento sobre a rocha e/ou de alguma feição que supostamente poderia estar relacionada à interação com esse. Todas as amostras foram identificadas e acondicionadas para transporte.

---

<sup>7</sup> Foram coletadas amostras de mão, compreendendo blocos indeformados de rochas extraídos dos afloramentos com a ajuda de martelo geológico.

**Figura 3.1** – Áreas selecionadas para o estudo da fosfatização dos solos. A) Praia das Tartarugas e B) Praia das Cabritas



### 3.2.2 Estudo petrográfico

As amostras coletadas foram inicialmente fotografadas e submetidas à descrição petrográfica em escala macroscópica, a olho nu. Quando necessário, essa descrição foi acompanhada pelo uso de lupa monocular com aumento de 10X. Foram considerados aspectos como textura, estrutura, cor e constituição mineral. As rochas, que já se encontravam separadas por suas respectivas unidades litológicas, foram identificadas e submetidas à análise microscópica para detalhamento taxonômico. Como haviam muitas repetições, foram selecionadas 20 amostras para a confecção de seções delgadas e polidas. As seções foram descritas em microscópio óptico trinocular com luz transmitida e refletida da marca Zeiss (modelo Axioskop 40), com câmera integrada para registro das fotomicrografias. Foram observados aspectos como: constituição mineral, texturas e estruturas.

Uma vez identificadas as rochas, o estudo petrográfico enfatizou as feições associadas à interação com os excrementos. Primeiramente as feições foram classificadas de acordo com sua morfologia (escala macro), sendo propostas tipologias, já que não há um sistema de classificação específico para esse fim. As feições foram relacionadas ao tipo de rocha no qual se encontram. Posteriormente, cada uma delas foi submetida à análise microscópica considerando os mesmos procedimentos adotados para as rochas, isto é, confecção de seções delgadas, observação em microscópio petrográfico e registro de fotomicrografias. Adicionalmente, os sítios mais representativos observados nas descrições foram selecionados para observação no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo QUANTA FEI 3D acoplado à espectroscopia EDS, em que foram realizados exames microquímicos, sendo elaborado mapas dos elementos Si, Ca, Mg, P, Fe, K, Al, Ti entre outros. Tal análise foi realizada no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais. As lâminas foram recobertas com filme condutor de carbono e montadas em suporte metálico, sendo obtidas imagens de elétrons retroespalhados.

### 3.3 Resultados

O estudo petrográfico revelou que as rochas coletadas na Formação Vulcão do Paredão, de natureza básica, são ankaratritos, ao passo que no Complexo Trindade, alcalino, foram amostrados fonolitos diversos e kauli-gauteíto, além de ejetólitos associados (**Quadro 3.1**).

São apresentadas a seguir as descrições macro e micropetrográficas para cada uma das rochas identificadas, e, posteriormente, as feições provenientes da interação com os excrementos das aves presentes nessas. A relação entre o tipo de feição e as rochas é feita como forma de verificar se existe um controle litológico da gênese das mesmas, bem como a relação entre as feições entre si permite compreender se há relação genética.

#### 3.3.1 Petrografia das rochas coletadas

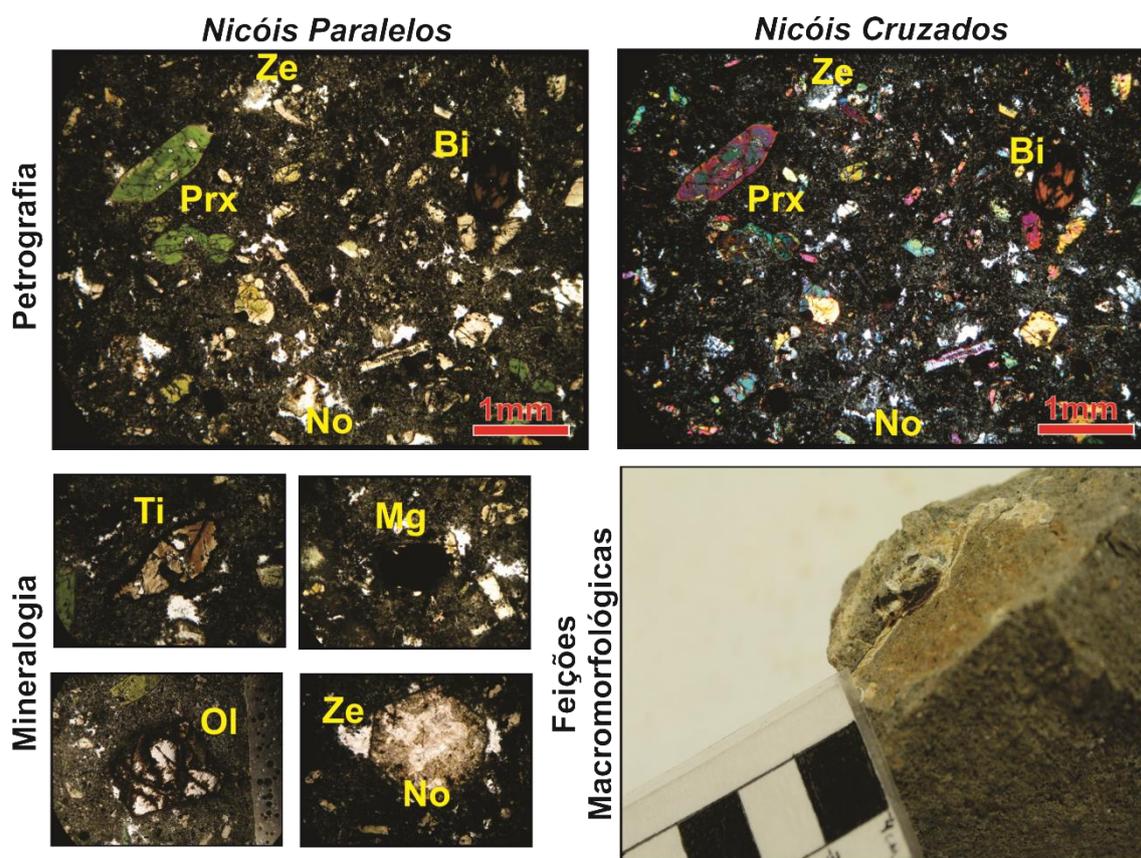
##### 3.3.1.1 Kali-gauteíto

Macroscopicamente, o Kali-gauteito é uma rocha fonolítica (ANTONELLO *et al.*, 2009), constituído por noseana, piroxênio, mica, titanita, anfibólios e magnetita de coloração variando entre cinza claro a cinza esverdeado, com natureza alcalina básica extrusiva porfirítica. Os principais minerais que podem ser identificados em nível microscópico são noseanas, magnetitas, biotitas, olivinas, zeolitas, titanitas e clinopiroxênios (**Figura 3.2**). Possui matriz fina, microcristalina e vesicular, com preenchimento de noseanas hipidiomórficas e zeolitas pós-magmática. Há predominância de fenocristais de piroxênios zonados com centro esverdeado e bordas mais esbranquiçadas, indicando diferenças na concentração de ferro. Ocorrem ainda fenocristais de titanita hipidiomórfica e olivinas, sendo que esta última se encontra em variados estágios de alteração para indigita. Alguns cristais de biotita apresentam bordas corroídas.

**Quadro 3.1 – Rochas identificadas por unidade geológica**

Área de Coleta	Geologia	Código	Amostra	Aspecto macroscópico
	Formação Vulcão do Paredão	TA	Ankararrito	
		TF1	Fonolito <i>stricto sensu</i>	
Praia das Tartarugas		TF2	Fonolito <i>stricto sensu</i>	
	Complexo de Trindade	TF3	Fonolito <i>stricto sensu</i>	
		TC	Crosta	
		CK	Kali-gaueíte	
	Complexo de Trindade	CF	Fonolito porfírico	
Praias das Cabritas		CPh	Perquinito biotita horblendito	
	Xenólitos e ejetólitos	CPp	Perquinito biotita piroxênio	

**Figura 3.2** – Fotomicrografia da amostra de Kali-gauteíto



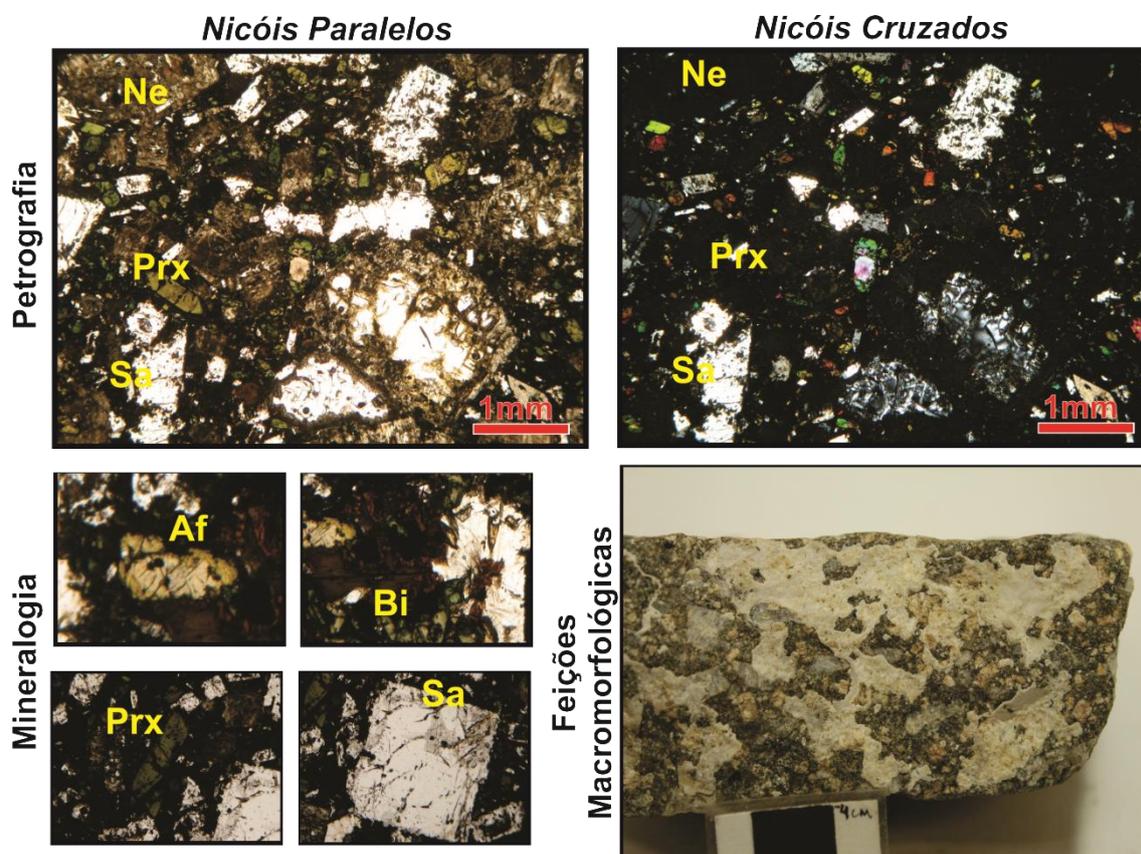
As imagens da Mineralogia possuem aumento de 10x. As abreviaturas correspondem à: Bi – biotita; Mg – magnetita; No – noseana; Ol – olivina; Prx – piroxênio; Ti - Titanita; Ze – zeolita.

### 3.3.1.2 Fonolito porfirítico

O fonolito porfirítico é uma rocha maciça, com coloração cinza-esverdeada e muitos fenocristais de nefelina e sanidina. Microscopicamente é holocristalina com textura porfirítica e matriz afanítica. Constituída por fenocristais de sanidina, nefelina, piroxênios alcalinos – aegirino-augita, titano augita e soda augita, anfibólio – horblenda, e mica – biotita, apresentados na **Figura 3.3**. Os microlitos da matriz são os mesmos que constituem os fenocristais. A apatita, magnetita e titanita ocorrem como minerais acessórios. Boa parte dos minerais estão fortemente fraturados e alterados com manchas amarronzadas, podendo se tratar de caulinição. A sanidina varia de 1 cm a 0,8 mm; enquanto o piroxênio varia de 3 mm a 0,1 mm. A nefelina varia de 2mm a 0,35 mm, e o anfibólio de 3 mm a 0,1 mm, e a biotita varia de 1,5 a 0,5 mm. Os Piroxênios alcalinos e anfibólios titaníferos são prismáticos e alongados, e pelo forte

pleocroísmo se confundem facilmente, o que é natural em rochas alcalinas (GILL, 2014).

**Figura 3.3** – Fotomicrografia da amostra de Fonolito porfirítico



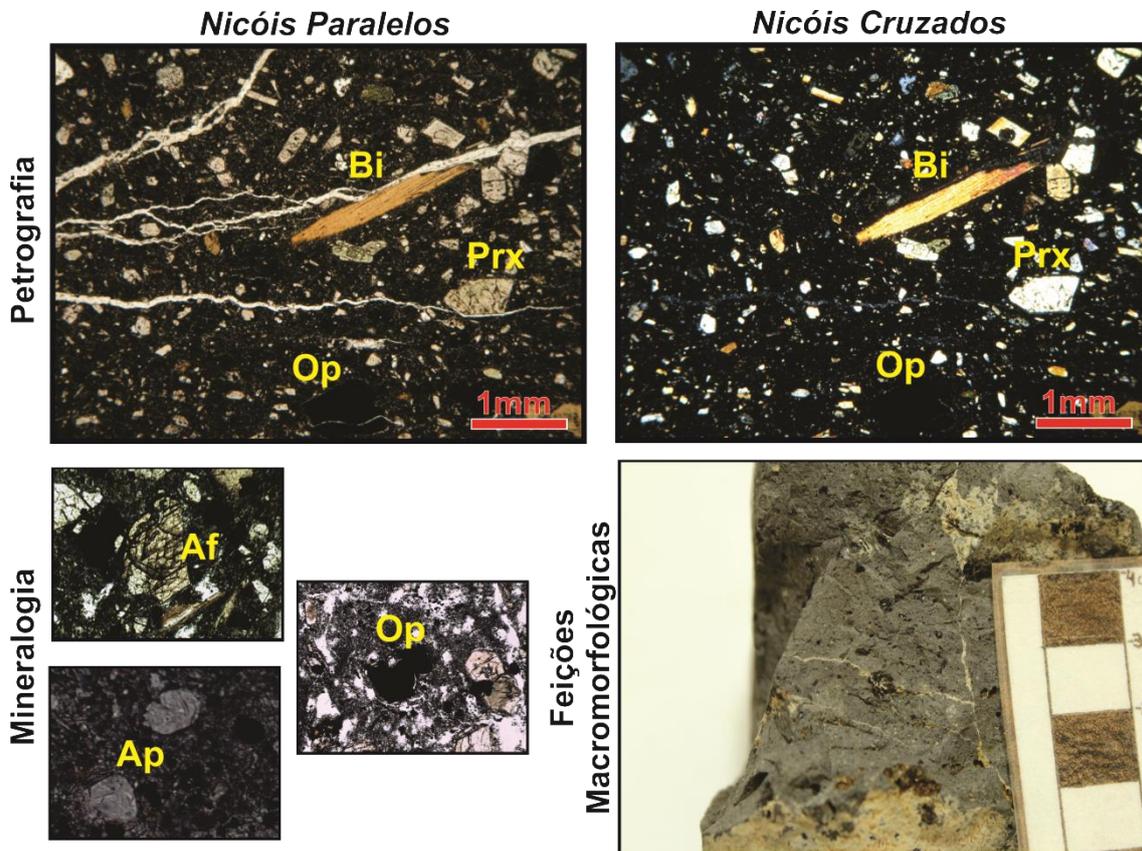
As imagens da Mineralogia possuem aumento de 10x. As abreviaturas correspondem à: Af – anfibólio; Bi – biotita; Ne – nefelina; Prx – piroxênio; Sa - sanidina.

### 3.3.1.3 Perquinito biotita horblendito

Os perquinitos são rochas granulares com mineralogia constituída essencialmente por minerais máficos (ALMEIDA, 1962). Microscopicamente apresenta textura porfirítica, matriz afanítica e holocristalina (**Figura 3.4**). É notável presença de fraturas, algumas preenchidas por zeólita. Mineralogicamente possuem clinopiroxênio – titano augita, minerais opacos, biotita, anfibólio – horblenda, titanita e apatita. As biotitas encontram-se alongadas, com cristais bem desenvolvidos e apresentando forte pleocroísmo. Os anfibólios e piroxênios são prismáticos com clivagem visível, ambos se encontram bastante fraturados e alterados. As apatitas estão presentes na matriz e inclusas nos anfibólios. O piroxênio varia de 6 mm a 0,1 mm, a biotita

varia de 1,5 mm a 0,1 mm, o anfibólio varia de 0,7 mm a 0,15 mm e os minerais opacos variam de 0,6 mm a 0,02 mm.

**Figura 3.4** – Fotomicrografia da amostra de Perquinito biotita horblendito



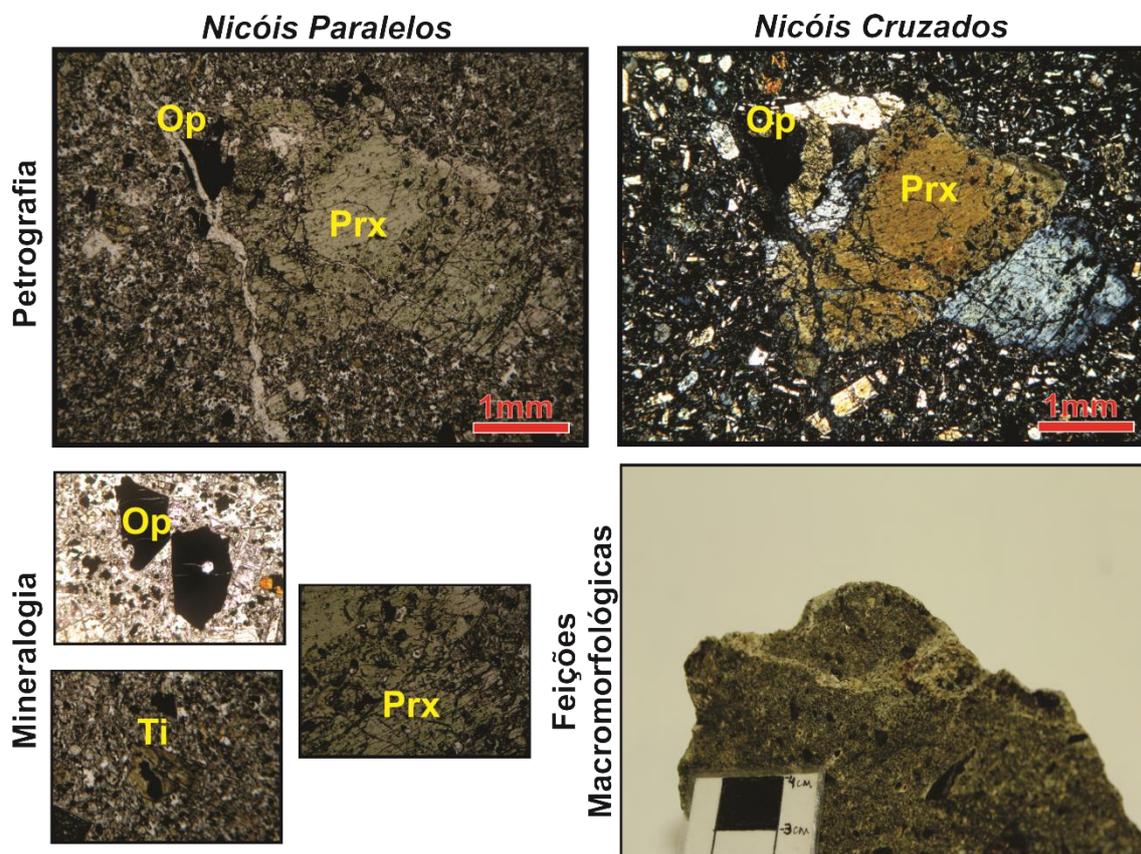
As imagens da Mineralogia possuem aumento de 10x. As abreviaturas correspondem à: Af – anfibólio; Ap – apatita; Bi – biotita; Op – opacos; Prx – piroxênio.

### 3.3.1.4 Perquinito biotita piroxênio

Trata-se de um perquinito que se diferencia do anterior (PBh) apenas pela composição mineral. A rocha possui mais de 70% de titanogaugita como mineral essencial (ANTONELLO *et al.*, 2009). É uma rocha de textura granular, holocristalina, constituída majoritariamente por clinopiroxênios, alguns zonados, esverdeados ao centro, e os demais de coloração bege sem zoneamento (**Figura 3.5**). Ocorre outro tipo de piroxênio em quantidades reduzidas, com cor de interferência mais alta (de 2ª ordem) de coloração incolor, diferente do bege esverdeado da titanogaugita. Nota-se que muitos minerais se encontram fraturados e alterados, além de inclusões de óxidos e mais raramente de apatitas e biotitas preenchendo fraturas e clivagens. Alguns piroxênios estão

sofrendo uralitização, evidenciada pela sobreposição de clivagens. Vale destacar a presença, mesmo que em baixas quantidades, de cristais zeolitizados. Clinopiroxênio varia de 3 mm a 0,1mm, opacos variam de 0,40 mm a 0,01mm.

**Figura 3.5** – Fotomicrografia da amostra de Perquinito biotita piroxênio



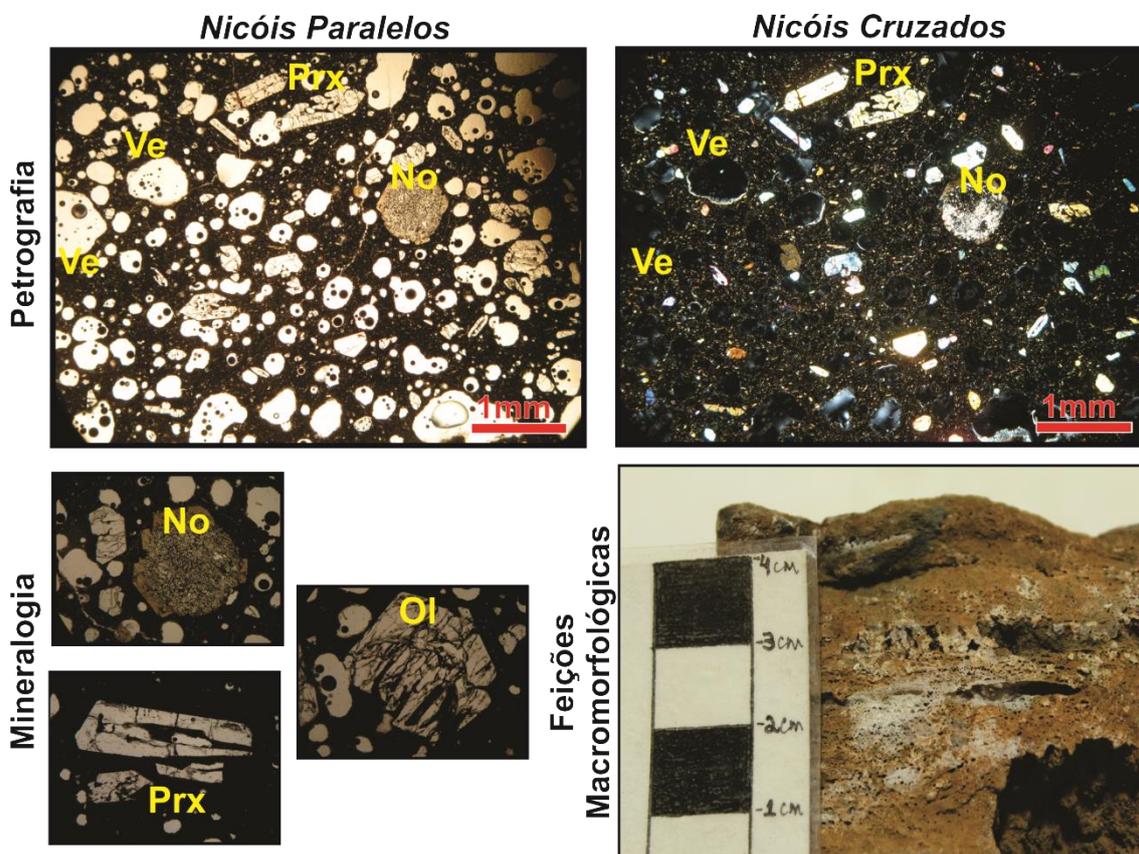
As imagens da Mineralogia possuem aumento de 10x. As abreviaturas correspondem à: Op – opacos; Prx – piroxênio; Ti - titanita.

### 3.3.1.5 Ankaratrito

O Ankaratrito é uma rocha ultrabásica de origem extrusiva porfírica, sendo melanocrática nefelina basalto com biotita (ANTONELLO *et al.*, 2009). As seções finas evidenciam a presença de olivinas, clinopiroxênios, magnetitas e noseanas, além dos poros vesiculares (**Figura 3.6**). Petrograficamente possui matriz vítrea, composta por fenocristais de olivina idiomórficas, piroxênios hipidiomórficos e vesículas arredondadas em quantidade expressiva. As olivinas apresentam estrutura esquelética devido a corrosão do magma, as quais se encontram muito fraturadas, com alguns cristais já em fase de alteração para

biotita e indigstita. As ripas de piroxênio são levemente orientadas de acordo com a direção do fluxo do magma, com alguns cristais zonados. Por fim, destaca-se a presença de algumas amídalas preenchidas por zeólitas.

**Figura 3.6** - Fotomicrografias da amostra de Ankaratrito



As imagens da Mineralogia possuem aumento de 10x. As abreviaturas correspondem à: No – noseana; Ol – olivina; Prx – piroxênio; Ve – vesículas.

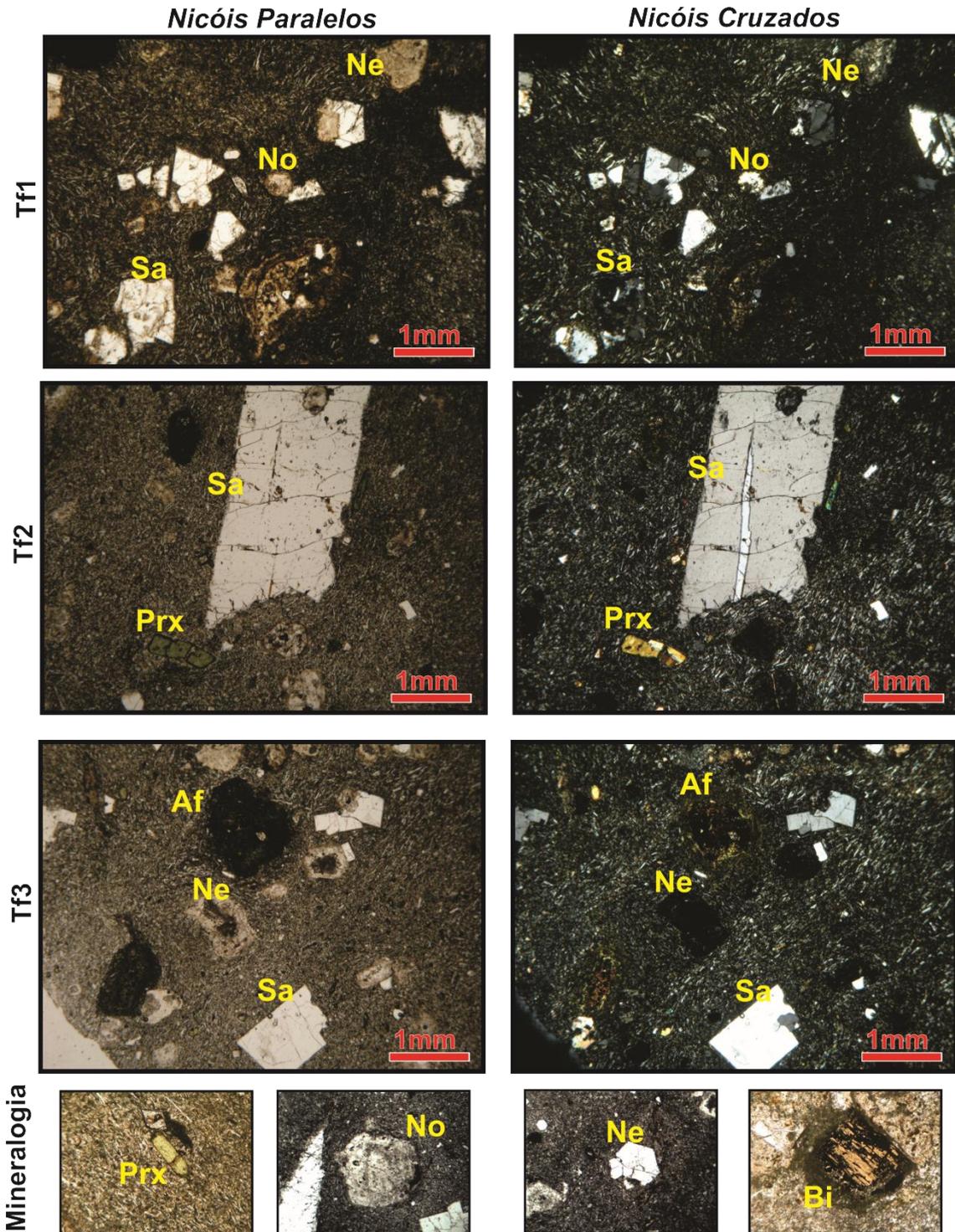
### 3.3.1.6 Fonolitos Stricto Sensu

Os fonolitos são os litotipos mais abundantes de Trindade, possuindo coloração esverdeada; explicada pela presença do piroxênio. Ao microscópio é uma rocha de textura porfirítica, com matriz afanítica holocristalina. Apresenta fenocristais de sanidina, noseana, piroxênio alcalino, nefelina, anfibólio e biotita (**Figura 3.7**). Como acessórios possui a titanita, magnetita e apatita.

Os fenocristais também ocorrem como minerais constituintes da matriz, com maior destaque para a sanidina e o piroxênio alcalino. O mineral mais abundante é a sanidina, com fenocristais idiomórficos variando de 1,5 mm até 8

mm. Possui hábito prismático, geralmente retangular. Vale destacar a presença de engolfamentos de corrosão nos fenocristais. Apresenta geminação pela Lei de Carlsbad. As noseanas ocorrem como fenocristais variando de 0,08 mm até 1,3 mm. Apresenta inclusões de opacos e zeólitos. Possui cor marrom e forma mais arredonda. Os piroxênios alcalinos – aegirinoaugita – ocorrem como fenocristais que variam de 0,2 mm até 1,0 mm, os cristais estão zonados e possuem cor verde-escuro. A nefelina ocorre variando de 0,2 mm a 1,0 mm. São cristais idiomórficos, com hábito prismático hexagonal e retangular.

**Figura 3.7 - Fotomicrografias das amostras de Fonolito Stricto Senso**



As imagens da Mineralogia possuem aumento de 10x. As abreviaturas correspondem à: Af – anfibólio; Bi – biotita; Ne – nefelina; No – noseana; Prx – piroxênio; Sa – sanidina.

### 3.3.2 Petrografia das feições ornitogênicas

Todas as amostras estavam parcialmente ou quase parcialmente revestidas por uma camada de coloração esbranquiçada a rosada/amarelada clara.

Quando a amostra provinha da parede de um afloramento, o revestimento era identificado na face exposta ao ar, ao passo que as amostras soltas, dispostas na superfície e próximas aos ninhais, estavam completamente ou quase completamente revestidas, sugerindo se trataram de fragmentos utilizados pelos próprios pássaros para a edificação de seus ninhos. Quando analisados, esses revestimentos revelaram distintas feições, classificadas macroscopicamente conforme sua morfologia e espessura. Seriam eles capeamentos delgados, preenchimentos de fraturas, crostas, eflorescências e córtex de alteração.

Os capeamentos delgados apresentam coloração esbranquiçada (**Figuras 3.2, 3.3**) a amarelada (**Figura 3.4**), são milimétricos e quase sempre pulverulentos e friáveis, com dureza muito baixa, além de apresentar odor característico do excremento. Alguns, de espessura um pouco maior, são descontínuos na superfície (**Figura 3.3**) e se desprendem com facilidade, sugerindo haver pouca interação com os constituintes da rocha. Entre o capeamento e a rocha não foi observada nenhuma zona intermediária que denotasse a presença de um córtex de alteração. A espessura dos capeamentos impossibilita que os mesmos sejam recuperados durante a confecção das seções delgadas, motivo pelo qual os mesmos não foram visualizados microscopicamente.

Os preenchimentos de fraturas caracterizam-se pela presença de soluções de excrementos no interior das rochas, cuja percolação se dá ao longo de planos de diáclises. Apresentam coloração variando de esbranquiçada (**Figuras 3.2 e 3.4**) a amarelada (**Figura 3.5**) e formato variável, conforme a trama de fraturas, quase sempre desenhando um reticular linear irregular (STOOPS, 2003). São quase sempre milimétricos e superficiais, sem que ocorram em maiores profundidades nas amostras. Microscopicamente, revelam preenchimentos transminerais, tanto da matriz fina (**Figura 3.8**) quanto dos fenocristais (**Figura 3.8 e 3.9C**). Ainda que delgadas, é possível perceber que os preenchimentos apresentam hábito cristalino de carbonatos, revelando ser essa sua composição principal. Mapas microquímicos confirmam tais observações, considerando que o cálcio é o principal elemento constituinte no interior de descontinuidades (**Figura 3.10C**), incluindo, por exemplo, fraturas no interior de cristais, como na sanidina (**Figura 3.11A**). Considerando sua composição

(12.88 %  $K_2O$ , 2.82 %  $Na_2O$ , 18.59 %  $Al_2O_3$ , 65.71 %  $SiO_2$ ), expressa em literatura (DEER et al., 1992), a presença de cálcio nos mapas microquímicos marcando feições lineares no interior do cristal de sanidina reforça a ocorrência da acumulação absoluta. Outros elementos acompanham o cálcio, como o P e o Mg, reiterando ainda mais que a contribuição provém dos excrementos.

As crostas são as feições de maior expressão da influência oritogênica nas rochas de Trindade. Tratam-se de revestimentos espessos (considerando o contexto), milimétricos a centimétricos, com coloração cinza-rosada e, por vezes, mais esbranquiçada. Apresentam dureza mais alta que os capeamentos, sendo necessário utilizar o martelo para fragmentá-las. Tais crostas não são texturalmente homogêneas, encontrando-se em uma mesma amostra coberturas mais lisas de textura fina, e partes com textura grossa, com aspecto rugoso. Ao microscópio, as crostas são facilmente reconhecidas. Possuem coloração dourada, característica de carbonatos. Essa matriz carbonática possui granulometria muito fina e microcristalina, contendo fenocristais de outros minerais comuns em rochas de Trindade. É possível reconhecer óxidos de ferro, fragmentos de piroxênio, fragmentos de vidro vulcânico, de sanidina, zircão, nefelina, magnetita, pedaços de concha, entre outros. As crostas possuem uma morfologia que lembra lentes deposicionais, estando estratificadas pela textura e pela cor. Algumas lentes são mais escuras que outras, e algumas camadas possuem mais fragmentos de minerais enquanto outras são constituídas apenas pela matriz carbonática. A própria solução seria responsável por carrear esses fragmentos minerais, posteriormente cimentados.

Mapas microquímicos apresentados nas **Figuras 3.10A e B** destacam o contato da crosta com a rocha e um corte transversal na crosta, respectivamente. Em ambas é possível distinguir as lentes deposicionais que formam as crostas. Embora tais lentes sejam distinguidas pela cor e textura, todas são formadas por Ca como cimentante, com sutis diferenças de concentração de uma lente para outra sugerindo camadas mais adensadas ou porosas. Novamente, tal como no preenchimento, o P e o Mg acompanham o cálcio na composição.

**Figura 3.8** – Aspectos macro e microscópico das feições ornitogênicas em rochas

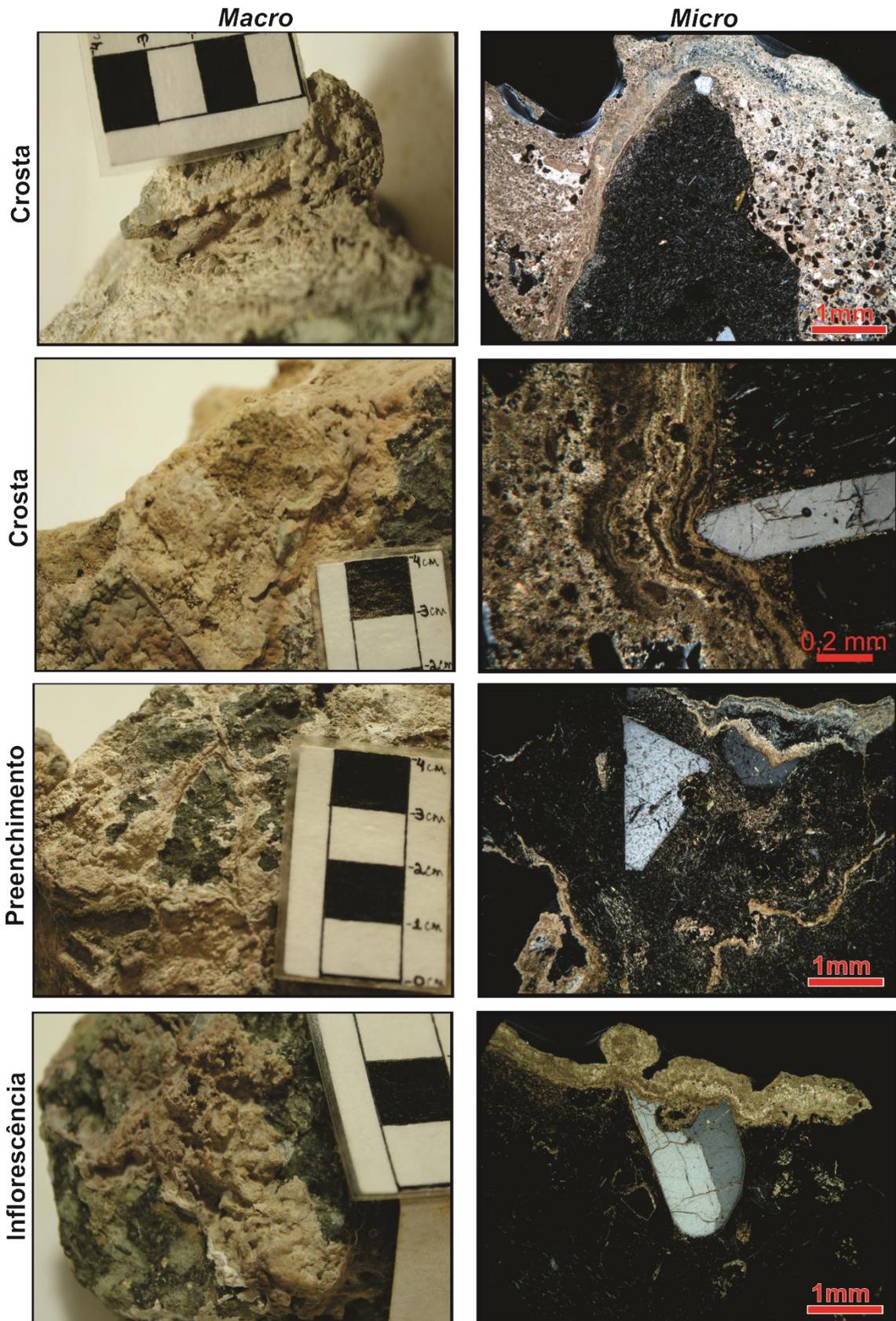
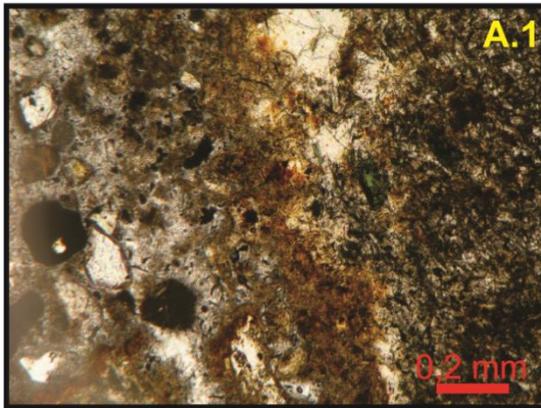
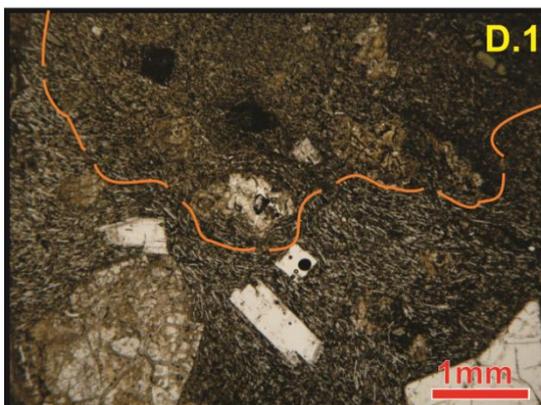
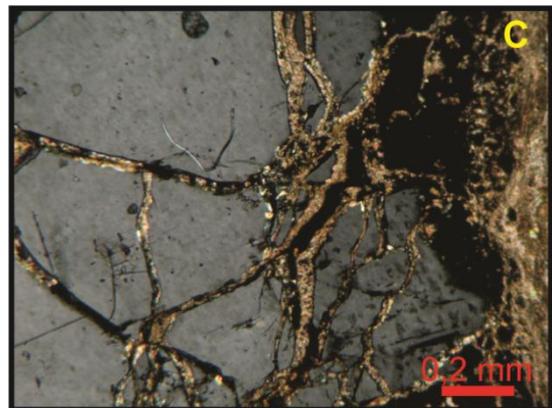
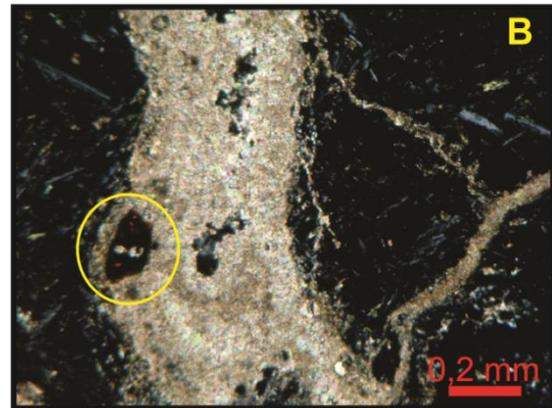
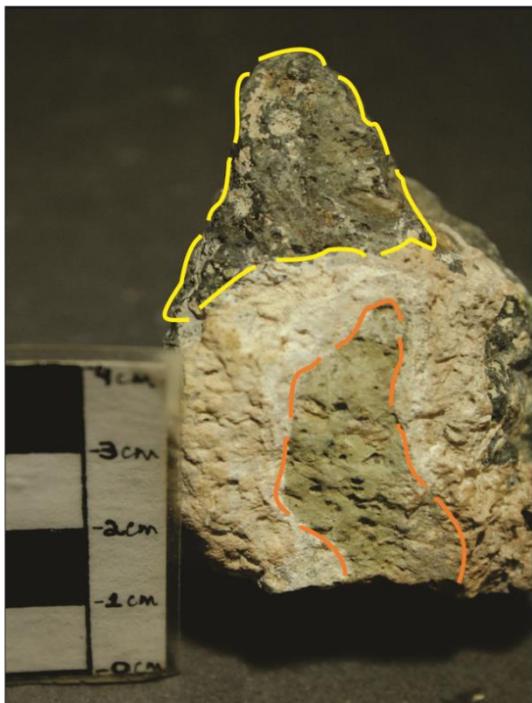
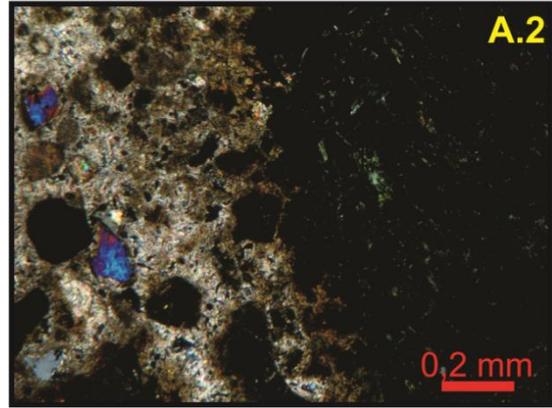


Figura 3.9 – Detalhamentos de algumas feições ornitogênicas observadas em rochas

*Nicóis Paralelos*



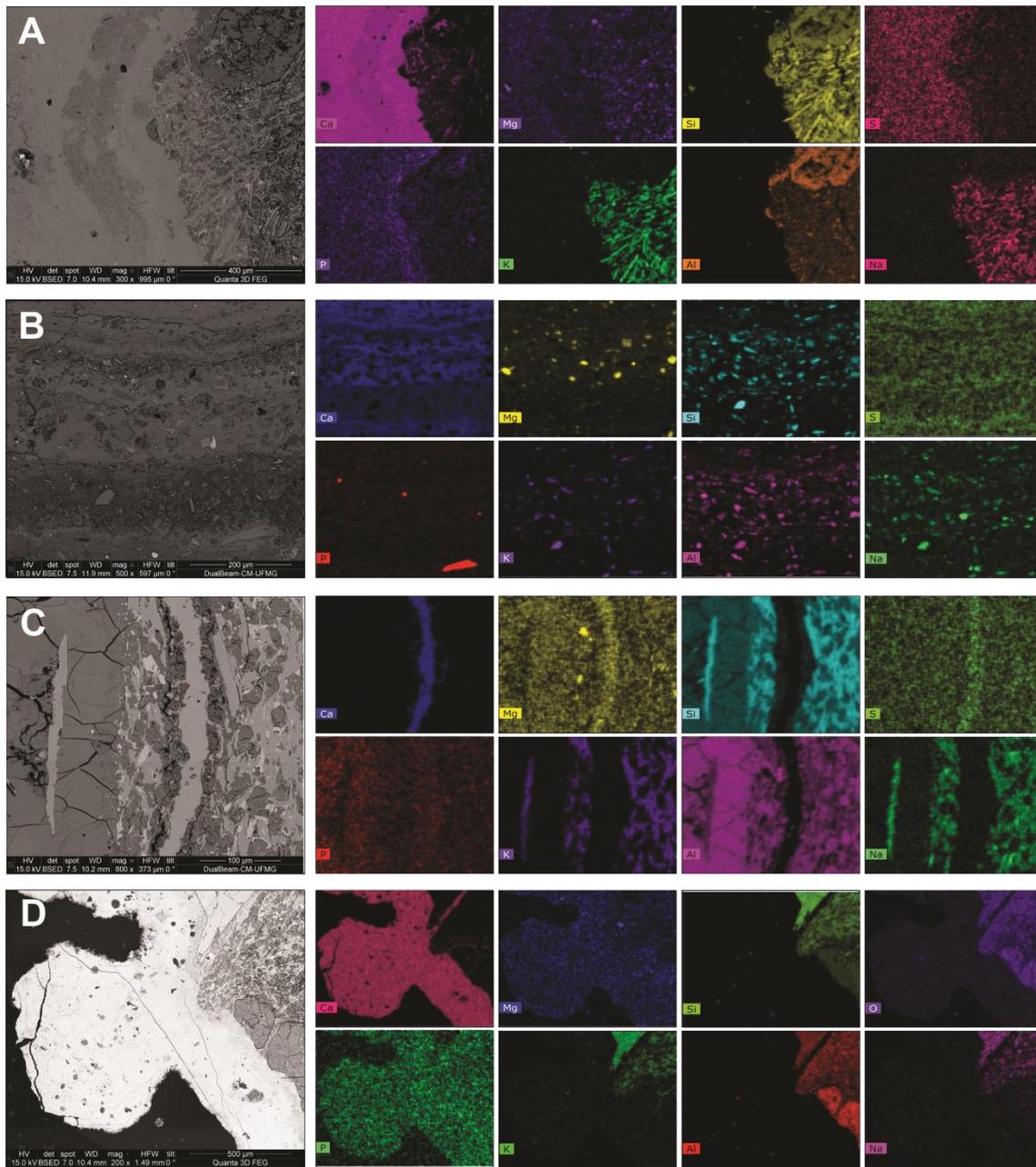
*Nicóis Cruzados*



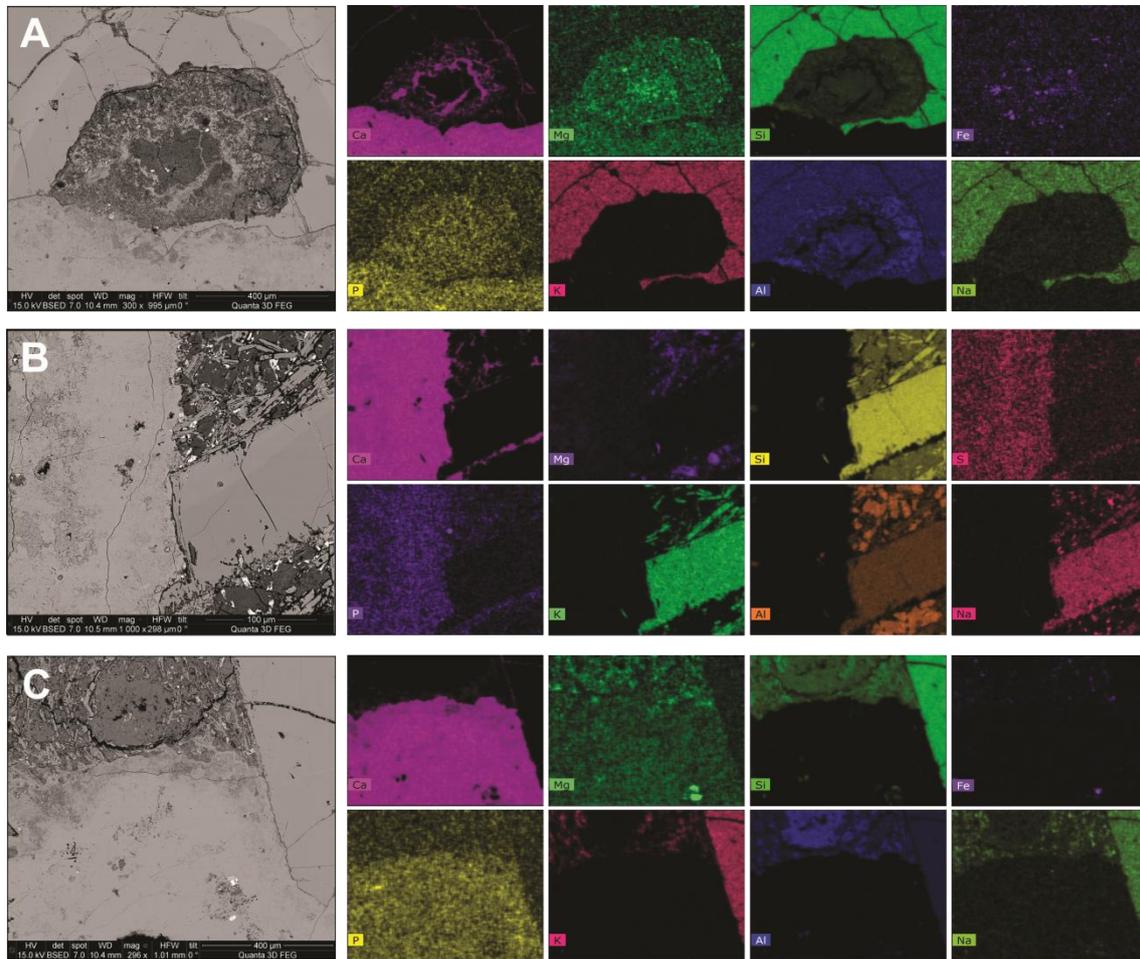
Na imagem da amostra de mão, em amarelo refere-se ao 1º grau de alteração, em alaranjado ao 2º grau de alteração. Em B, o círculo destaca um fragmento de vidro vulcânico dentro de uma fratura preenchida.

As imagens micro estão com os nicóis cruzados.

**Figura 3.10** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (as cores indicam a presença do elemento químico) destacando: A e B) crosta ornitogênica; C) feição de preenchimento de fratura por solução ornitogênica; D) inflorescência.



**Figura 3.11** – Imagem de elétrons retroespalhados e mapas microquímicos (as cores indicam a presença do elemento químico) destacando: A) crosta (parte inferior da imagem) e preenchimento das fraturas de um cristal de sanidina; B) e C) contato entre a crosta, a matriz e um fenocristal de sanidina



As eflorescências estão associadas às crostas e representam a porção superior dessas. Constituem pequenas brotoejas superficiais (**Figura 3.8**) que se destacam em relação à superfície no qual ocorrem (microrrelevo positivo). Possuem coloração cinza-rosada a amarelada, dureza e textura semelhantes às crostas. Em nível microscópico, apresentam zonas deposicionais que se projetam geralmente a partir de algum obstáculo presente na crosta, como um fenocristal, por exemplo. Possuem o mesmo comportamento óptico da crosta, sugerindo a mesma composição carbonática. Os mapas microquímicos reiteram que os elementos constituintes são o Ca, principalmente, e o P e Mg, secundariamente (**Figura 3.10D**).

O córtex de alteração compreende zonas de alteração intempérica superficial e podem ser facilmente visualizados pelas variações de cor que aparecem na superfície das rochas. É conhecido que ao interagir com a matriz da rocha, a solução ornitogênica proveniente do guano pode atuar como uma solução de alteração (HUTCHINSON, 1950; TATUR, 1989). Contudo, todo o ambiente tropical da ilha é propício para a alteração das rochas (DELVIGNE, 1999), havendo outros mecanismos que podem levar à formação de córtex. Por esse motivo, tais feições não podem ser diretamente relacionadas à interação com os excrementos. Ainda assim, algumas amostras coletadas apresentaram córtex de alteração muito claros, sugerindo que em determinadas situação eles tenham sido produzidos pelas reações com o excremento.

Macromorfologicamente, duas seções de córtex foram reconhecidas. Na primeira, mais interna, alguns minerais apresentam sinais de oxidação e a rocha começa a ficar mais clara. Na segunda, mais superior, a rocha fica muito mais friável, a coloração passa de verde escuro para verde claro, os minerais estão mais oxidados e alterados. Na **Figura 3.9**, a parte da amostra não revestida por crosta apresenta alteração incipiente, em contraste com a parte em contato direto com a crosta, que demonstra alteração muito mais elevada, com as características explicitadas anteriormente.

Em microscópio, as imagens **A.1** e **A.2** da **Figura 3.9**, mostram a zona de oxidação da rocha associada à presença da crosta ornitogênica. As imagens **D.1** e **D.2** também expõem a possível alteração da matriz em contato com a solução. Destacado pelo tracejado alaranjado, nota-se a matriz mais amarronzada, com maior presença de opacos em detrimento dos micrólitos de sanidina. O intemperismo tende a ser mais eficiente em locais de maior fraqueza, como defeitos na cristalização dos mineiras, clivagens, microfraturas, descontinuidade química, inclusões e em minerais de menor tamanho (STOOPS, et al., 1979), o que justificaria uma maior alteração da matriz.

### 3.4 Existe um controle litológico na formação de feições ornitogênicas?

Os resultados obtidos confirmam a influência da nidificação da avifauna nas transformações dos substratos via interação dos excrementos com as rochas. Essa influência se dá pela formação das feições enriquecidas em Ca (+P+Mg) acima descritas. Vale, contudo, considerar se o tipo de rocha e suas estruturas, texturas e mineralogia tem influenciado na formação dessas feições.

Dentre os seis tipos de rochas estudados, o fonolito *stricto sensu* perfaz a rocha sob a qual a interação ornitogênica ocorre com maior intensidade. O ankaratrilo, fonolito porfirítico, os perquinitos e o kali-gauteíto são rochas que, em aspectos estruturais, seriam passíveis de obter as mesmas transformações sofridas pelo fonolito. No entanto, conforme sistematizado no **Quadro 3.2**, as crostas foram identificadas apenas nos fonolitos.

**Quadro 3.2** – Feições identificadas nas rochas de Trindade

	Capeamento delgado	Preenchimento de Fraturas	Crosta	Eflorescências	Córtex de alteração
Kali-gauteíto	X	X			
Fonolito porfirítico	X				
Perquinitos	X	X			
Ankaratrilo	X	X			X
Fonolito <i>stricto sensu</i>	X	X	X	X	x

X – indica que a feição foi identificada no respectivo tipo de rocha

Mesmo que os resultados levem à interpretação de que os fonolitos são mais favoráveis à formação de crostas, tais rochas não possuem significativas diferenças das demais, sobretudo do kali-gauteíto e fonolito porfirítico, que justifique um controle litológico. Com exceção do ankaratrilo, mais poroso, todas as demais tendem a dificultar a penetração das soluções excretadas pelas aves por se tratarem de rochas cristalinas com matriz fina, em que os planos de contato intermineral estão bem suturados. Assim, é prudente sugerir que não se trata de um controle da rocha, mas da sua abundância e posicionamento.

Os fonolitos *stricto sensu* correspondem às rochas de maior ocorrência em toda a Ilha (ALMEIDA, 1962; ANTONELLO et al., 2009), estando presentes em duas formações litológicas: o Complexo de Trindade e a Sequência Desejado. São as rochas que compõem os necks e domos espalhados Trindade, os

quais, por sua vez, representam as principais áreas de nidificação das aves (FONSECA NETO, 2004). As amostras das demais rochas também recebem a colonização dos ninhais, mas, ao que tudo indica, com frequência menor ou, ainda, indiretamente apenas por soluções lixiviadas das elevações.

Se o agrupamento taxonômico parece não exercer um controle litológico, os atributos das rochas, independentemente de quais elas sejam, podem estar conduzindo à formação de algumas feições específicas, destacando os preenchimentos, as eflorescências e o córtex de alteração. No caso dos preenchimentos, a existência de fraturas inter e transminerais é fundamental para a percolação dos excrementos, sem as quais os mesmos seriam retidos apenas na superfície. É provável que tais fraturas tenham origens diversas, como a perda de volume pelo resfriamento magmático, o alívio de pressão a partir da exposição dos corpos intrusivos confinados (como os necks) e o próprio intemperismo físico superficial, como por dilatação diferencial. No caso das eflorescências, a presença de fenocristais parece ser fundamental, já que eles revelaram se tratar apenas de um molde associado a sua presença. Os córtex, por sua vez, parecem ter uma relação íntima com a textura da rocha, sobretudo em relação à presença de uma matriz fina mais ou menos alterável. O próprio capeamento e a crosta sugerem ter relação com a higroscopicidade das rochas, acumulando-se na superfície de apoio que serve como base para a reprecipitação de novos minerais e cimentação de outros depositados.

### **3.5 Existe uma relação genética entre as feições?**

Quando comparadas por seus atributos morfológicos, as feições ornitogênicas são distintas em alguns aspectos, sendo justamente esse o motivo que leva a sua identificação. Contudo, a partir da caracterização petrográfica, tais feições revelam algumas semelhanças fundamentais, com destaque para: i) são quimicamente compostas por Ca, com P e Mg; ii) apresentam estruturas deposicionais, iii) envolvem neomineralizações, mas também cimentação de minerais já existentes e iii) são formadas por acumulação absoluta. Além disso, considerando sua ocorrência, mesmo que uma amostra não contenha todas as feições, elas raramente ocorrem individualizadas, havendo, normalmente, três

associações: “capeamentos + preenchimentos de fraturas”; “crostas + preenchimentos de fraturas + eflorescências” e “crostas + córtex de alteração”. Tais associações sugerem uma relação genética entre elas e permite tecer discussões preliminares sobre sua gênese.

Em primeiro lugar, Hutchinson (1950) afirma que as condições ideais para a formação dos depósitos de guano se dão quando o substrato receptor possui morfologia capaz de reter os excrementos, com precipitação e temperatura a níveis não muito elevados para que o depósito não seja lavado. Assim, se o tempo de permanência dos excrementos em contato com o substrato é importante, ele terá provavelmente a capacidade de influenciar na formação de feições diferenciadas. Assim parece ocorrer em Trindade.

A nidificação ocorre principalmente nos afloramentos rochosos. Contudo, a colonização nesses afloramentos é, sobretudo, em cavidades formadas por blocos desabados. No interior dessas, os pássaros possuem as condições favoráveis para nidificar, o que leva, concomitantemente, a um acúmulo de excrementos nessas áreas. Além disso, essas áreas são mais protegidas das chuvas, evitando a diluição das soluções. Numa outra perspectiva, há também alguma colonização em áreas externas, onde o excremento depositado é mais lavado para as baixadas. Eventualmente, blocos em áreas nidificadas também podem se movimentar por força gravitacional, tornando ornitogênicas áreas à jusante que não recebem colonização da avifauna. Assim, existem setores de maiores e menor acumulação de guano em Trindade, corroborando com estudos que atestam que a dinâmica e ampliação da zona espacial de interação guano-substrato se dará de acordo com a dinâmica de precipitações e a geomorfologia do local de nidificação (HUTCHINSON, 1950; MYRCHA et al., 1985; OLIVEIRA, 2008).

Como há diferenças na intensidade da deposição de excrementos, quando ela ocorre em rochas fraturadas, parte dessas soluções percolam as discontinuidades e remineralizam “carbonatos” no seu interior, obliterando a entrada de novas soluções. A partir disso ficam estabelecidas as condições necessárias para que a acumulação se dê em superfície. De outra maneira, quando a rocha não está fraturada, a acumulação parece se dar diretamente

na superfície, formando as crostas ou capeamentos. Esses se diferenciam basicamente pela quantidade de material acumulado na superfície, o que deve ter relação com a fonte (intensidade de nidificação) e com o tempo de permanência (idade do depósito). De qualquer maneira, ambos são feições deposicionais mistas, envolvendo clastos e reprecipitação química, podendo o capeamento representar uma fase antecessora da formação de uma crosta. As eflorescências, por seu turno, representam feições morfológicas desenvolvidas conjuntamente às crostas, em condições específicas onde há a presença de moldes durante a reprecipitação mineral.

Ainda que contenha diversos elementos semelhantes com outras áreas ornitogênicas, algumas particularidades da Ilha de Trindade permanecem como questões a serem respondidas. Chama a atenção, por exemplo, a composição química das crostas estudadas. Oliveira (2008) e Schaefer et al. (2009) em trabalhos realizados em São Pedro e São Paulo determinaram que as crostas possuíam em média 45,73% de CaO; 31,42 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 17,93 % de Si<sub>2</sub>O; 1,82% de MgO e 1,13% de FeO. Hutchinson (1950) relata composição parecida para crostas ornitogênicas de diversas ilhas do Pacífico, como na Ilha de Jarvis com 38,32% de CaO e 50,04% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e na Ilha Molden, com 43,45% de CaO, 43,04% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 3,97 % MgO. Pela maior quantidade de fósforo observada, essas crostas foram adjetivadas de fosfáticas, o que parece não ocorrer em Trindade, para o qual o melhor termo seria “carbonáticas”.

O que teria levado a tais diferenças? A dieta das aves em Trindade é diferenciada das demais ilhas oceânicas brasileiras, refletindo na baixa ingestão e excreção de fósforo? Conforme Fonseca Neto (2004), em Trindade os pássaros consomem uma quantidade maior de moluscos, principalmente de classes que apresentam carapaças carbonáticas como bivalves e gastrópodes. Isso estaria contribuindo para um excremento mais enriquecido em cálcio, já que esses animais possuem carapaças carbonáticas? Numa outra possibilidade, não excludente, haveria um papel importante das precipitações na lixiviação de íons com P e Ni, pois, conforme Hutchinson (1950), quando exposto à precipitação o guano é lixiviado, resultando na perda de sais solúveis e devido à incongruência na solubilidade dos fosfatos de cálcio, perde-se também íons de fosfato? Ademais, em ambientes tropicais a decomposição do

material orgânico do guano também influencia na perda de nitrogênio e fósforo, principalmente por perda de compostos voláteis.

Fato é que as feições ornitogênicas nas rochas de Trindade nunca foram antes abordadas, e os resultados obtidos compõem estudo preliminar. Investimentos futuros envolvendo o aumento das áreas amostrais e técnicas de análise, principalmente na composição química do guano, são caminhos a serem trilhados para a compreensão mais ampla de como os excrementos têm afetado, pela atividade da avifauna, as rochas da Ilha da Trindade.

### **3.6 Considerações Finais**

Os processos associados à ornitogênese em Trindade foram comprovados principalmente devido à presença de feições típicas nas distintas rochas que constituem a Ilha. Os mapas microquímicos desses materiais respondem não só por reafirmar o papel da ornitogênese na transformação dos substratos, como por elucidar a composição química das feições.

Apesar de ocorrer indiscriminadamente nos mais diversos materiais, a influência dos distintos tipos de rochas na ornitogênese parece ocorrer relacionada à intensidade da nidificação. O fonolito *stricto sensu*, por ser a rocha que constitui as principais áreas de ninhais, é o litotipo mais afetado pela colonização da avifauna. Demais atributos das rochas, como fraturas, presença de matriz e fenocristais, higroscopicidade, entre outros, independentemente da tipologia, tem influenciado na gênese de distintas feições.

A relação genética entre as feições permite considerar uma trajetória evolutiva para o papel exercido pela atividade da avifauna na transformação dos substratos rochosos. Essa relação genética parece estar fortemente influenciada às condições de deposição dos excrementos, como a quantidade, o tempo de permanência e a concentração desses.

Um cuidado especial deve ser tomado com relação a natureza composicional das feições. Enquanto em outros ambientes insulares estas são constituídas

por elevadas porcentagens de P, em Trindade os resultados apontam para uma constituição majoritariamente dependente de Ca.

Novos investimentos devem ser feitos para compreender como ocorrem formação e evolução das feições a partir da sua constituição química. Assim como em outros estudos, houve a confirmação da importância de se considerar o material de origem e a influência direta e indireta dos ninhais. No entanto, a dinâmica atmosférica de precipitação e a dieta alimentar das aves são novos fatores que podem exercer papel relevante.

### **3.7 Referências Bibliográficas**

ALMEIDA, F. F. M. Geologia e Petrologia da ilha da Trindade. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1961, 197 p.

ALMEIDA, F.F.M. Petrologia da Ilha da Trindade. Tese para concurso à cátedra da USP. São Paulo, 1962, 223p.

ALMEIDA, F. F. M. Ilhas oceânicas brasileiras e sua relação com a tectônica atlântica. *Terræ Didactica*, 2(1): 3-18, 2006.

ANDERSON, W. B.; POLIS, G. A. Nutrient fluxes from water to land: seabirds affect plant nutrient status on Gulf of California islands. *Oecologia*, 118:324-332, 1999.

ANTONELLO, L. L.; ZUCOLOTTO, M. E.; CASTRO, J. W. A. Microscopia de rochas da coleção de petrografia do Museu Nacional / UFRJ: Ilha da Trindade, Brasil. In: MOHR, L. V., CASTRO, J. W. A., COSTA, P. M. S., ALVES, R. J. V. (Eds.) Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. Brasília. Ministério do Meio Ambiente. p. 105-124, 2009.

CASTRO, J. W. A., ANTONELLO, L. L. Geologia das ilhas oceânicas brasileiras. In: Alves, R. J. V., CASTRO, J. W. A. (Eds.) Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo. Brasília. Ministério do Meio Ambiente. 2006, p. 29-57.

CLEMENTE, E. C. Ambientes terrestres da Ilha da Trindade, Atlântico Sul: caracterização do solo e do meio físico como subsídio para a criação e uma unidade de conservação. Doutorado (tese do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. 2006, 167p.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 2nd ed. Pearson, New York, 1992., 696 p.

DELVIGNE, J. E. Atlas of micromorphology of mineral and weathering. Canada Mineralogist Special Publication 3. Mineralogical Association of Canada and ORSTOM Paris. Ottawa, Ontario, 1999, 509p.

FONSECA NETO, F. P. Aves marinhas da ilha Trindade. In: BRANCO, J. O. (org.) Aves marinhas insulares brasileiras: bioecologia e conservação. Editora da UNIVALI, Itajaí, SC, 2004, p.119-146.

GILL, R. Rochas e processos ígneos: um guia prático. Porto Alegre: Bookman, 2014, 427p.

HUTCHINSON, G. E. Survey of contemporary knowledge of biogeochemistry. 3 – The biogeochemistry of vertebrate excretion. Bulletin of the American Museum of Natural History, v. 96, 1950, 279p.

IRICK, D. L.; GU, B.; LI, Y. C.; INGLETT, P. W.; FREDERICK, P. C.; ROSS, M. S.; WRIGHT, A. L.; EWE, S. M. L. Wading bird guano enrichment of soil nutrients in tree islands of the Florida Everglades. Science os the Total Environment, 532:40-47, 2015.

LANDIS, C. A.; CRAW, D. Phosphate minerals formed by reaction of bird guano with basalt at Cook Head Rock and Green Island, Otago, New Zealand. Journal of the Royal Society of New Zealand, 33:1, 487-495, 2010.

MYRCHA, A., PIETR, S.J., TATUR, A. The role of Pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), Antarctic nutrient cycles and food webs. Springer-Verlag, Berlin, p. 156-163, 1985.

MYRCHA, A., TATUR, A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, 12, 1:3-24, 1991.

NAHON, D.B. Self-organization in chemical lateritic weathering. *Geoderma*, Amsterdam, v.51, p.5-13, 1991.

OLIVEIRA, F. S. Fosfatização em solo e rocha em ilhas oceânicas. Mestrado (dissertação do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. 2008, 115p.

OLIVEIRA, F. S., ABRAHÃO, W. A. P., SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 63(2): 239-246, 2010.

RUGENSKI, A. Investigação geofísica dos complexos alcalinos do sul e sudeste do Brasil. Doutorado (tese do Programa de Pós Graduação em Geofísica. Universidade de São Paulo, 2006, 352p.

SÁ, M. M. F. Caracterização ambiental, classificação e mapeamento dos solos da ilha da Trindade, Atlântico Sul. Mestrado (Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, 2010, 58 p.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R., MICHEL, R.F.M., VIANA, J.H.M., TATUR, A. Fosfatização: processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: SCHAEFER, C.E.G.R., FRANCELINO, R., SIMAS, F.N.B., ALBUQUERQUE FILHO, R. (eds.), *Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. NEPUT e Departamento de Solos, Viçosa, 2004, p.47-59.

SCHAEFER, C. E. G. R; OLIVEIRA, F. S.; SIMAS, F. N. B.; ABRAHÃO, W. A. P.; MELLO, J. W. V. A fosfatização pela ação das aves: de Darwin as pesquisas atuais. In: VIANA, D. L. V. (org.) *O arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estão Científica*. Brasília, DF: SECIRM, 2009, p. 270-276.

SMITH, B. J.; McALISTER, J. J.; SICHEL, S. E.; ANGEL, J.; BAPTISTA-NETO, J. A. Ornithogenic weathering of an ultramafic plutonic rock: St. Peter and St. Paul Archipelago, Central Atlantic. *Environ Earth Science*, 66:183-197, 2012.

STOOPS, G. Guidelines for the analysis and description of soil and regolith thin sections. SSSA. Madison, WI. 2003.

STOOPS, G.; ALTEMÜLLER, H. J.; BISDOM, E. B. A.; DELVIGNE, J.; DOBROVOLSKY, V. V.; FITZPATRICK, E. A.; PANEQUE, G.; SLEEMAN, J. Guidelines for the description of mineral alterations in soil micromorphology. *Pedologie*, XXXIX, 1:121-135, 1979.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the maritime antarctic. *Polish Polar Research* 4, 481–532, 1989.