



**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS SEDIMENTOS COSTEIROS  
DA NAMÍBIA, ÁFRICA**

**Porto Alegre, 2016**

## UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Tutikian

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Pinto, Taís Fontes

Caracterização mineralógica dos sedimentos costeiros da Namíbia, África. / Taís Fontes Pinto. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. [145 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es): Marcia Elisa Boscato Gomes

Coorientador(es): Maria Lídia Medeiros Vignol-Lelarge

1. Namíbia 2. Mineralogia 3. Sedimentos costeiros 4. Rios efêmeros  
I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. T. Binotto

CRB 10/1743

**Taís Fontes Pinto**

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS SEDIMENTOS COSTEIROS DA  
NAMÍBIA, ÁFRICA**

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

**Orientadores:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Márcia Elisa Boscato Gomes

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Lidia Medeiros Vignol-Lelarge

**Supervisor:** Prof. Dr. Christophe Renac

Porto Alegre, 2016

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS SEDIMENTOS COSTEIROS DA NAMÍBIA, ÁFRICA**”, elaborado por TAÍS FONTES PINTO, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Cassiana Michelin

---

Edinei Koester

---

Marcus Vinicius Dorneles Remus

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos dizendo que não somente me sinto agradecida, mas também honrada, por ter a oportunidade de trabalhar com professoras que tanto admiro. Márcia, te agradeço por ter aceitado o meu convite de orientação, enviado por email, do outro lado do Oceano Atlântico. Obrigada por acreditar no projeto e sempre se mostrar muito entusiasmada com tudo, devo dizer que tal entusiasmo é contagiante e muito inspirador. Lidia, obrigada por ter aceitado entrar neste projeto, que caiu nas tuas mãos tão repentinamente. Apesar das complicações deste ano, as oportunidades que tivemos para conversar foram muito valiosas e agradeço pelas conversas de cunho científico e até mesmo social. À vocês duas só tenho a minha mais profunda admiração, que certamente seguirá crescendo pelos anos que ainda virão.

Ao meu supervisor, Christophe Renac, que me acolheu por um curto período de tempo, porém o suficiente para compartilhar grandes conhecimentos e oportunidades. Obrigada por tornar viável a análise dos materiais neste trabalho estudados.

Aos professores Carla e Edinei, com quem tive grande contato neste último ano, no Laboratório de Geologia Isotópica. Agradeço pela confiança e por todos ensinamentos que foram fornecidos neste período. Também agradeço à minha primeira orientadora em trabalhos de iniciação científica, Karin Goldberg, que sempre mostrou que se deve amar o que se faz, e que muito me inspirou nos anos iniciais de graduação.

À minha família, que sempre me deu suporte e apoio nesta longa jornada pela graduação. Mãe e pai, obrigada por acreditarem no meu potencial mesmo quando eu tinha dúvidas, obrigada por apoiarem meus sonhos, mesmo quando eles significavam passar longos períodos longe de vocês.

Aos meus amigos, que certamente são os melhores que eu poderia ter. Daniel, obrigada pelas incontáveis conversas embaladas a muito chá, e também obrigada por todas as críticas, eu as odeio, mas sei que sem elas eu não estaria onde estou hoje (tu queria três parágrafos de agradecimento, então estou te dando mais esta frase aqui). Beloni, agradeço pelas conversas e por todas as vezes que tu me disse para não me preocupar tanto, acho que agora, depois de meses, finalmente entendi a ideia. À Bruna, que foi direto do gueto para o meu coração, a graduação certamente não seria a mesma

coisa sem a tua presença, obrigada por me resgatar no TCI. Ao Márcio, que apesar das zueiras sem limites proporcionou ótimas conversas e ensinamentos químicos (a vida depois do epoxy é muito melhor). Ao Laerte, que não somente me passou seus preciosos conhecimentos em MEV, como me aturou como colega de sala esse ano todo. E por último, mas não menos importante, ao Willian, por todo o imenso apoio durante a graduação e por ter embarcado na aventura escandinava comigo, tudo valeu à pena.

E um agradecimento especial aos geólogos que mesmo não fazendo parte deste projeto, me ajudaram imensamente. Maria Alejandra, obrigada pelos ensinamentos sobre foraminíferos, e Daniel Vieira, obrigada pelas conversas sobre vida acadêmica.

*“A true hero isn’t measured by the size of his  
strength, but by the size of his heart.”*

Hercules

## RESUMO

A Namíbia, localizada na porção sudoeste da África, é um país de grande extensão e variedade geológica. Devido ao seu clima semiárido e presença de grandes massas desérticas, as principais atividades econômicas desenvolvidas são a mineração e a pesca. Também se tem conhecimento de que parte de seu embasamento geológico é composto por depósitos minerais diversos, propiciando a mineração de elementos como zinco, urânio, chumbo, entre outros. Do ponto de vista ambiental, o governo da Namíbia tem procurado saber se há interações entre os materiais minerados e o meio biológico, se há ou não contaminação dos sedimentos e da biota. De forma a teorizar sobre possíveis contaminações, foi feito o estudo da composição dos sedimentos imersos da costa da Namíbia, para verificar se existe a presença dos minerais componentes de mineralizações na costa. A partir desta análise também se pode tecer considerações sobre a eficácia dos processos sedimentares de erosão e transporte dos materiais em um ambiente tão diferenciado. A amostragem foi realizada ao Norte da cidade de Walvis Bay e nas proximidades de Lüderitz. Foram coletadas 16 amostras, onde cada uma foi fracionada em fração inferior e superior a 10  $\mu\text{m}$ . As amostras apresentaram pouca variabilidade granulométrica. As principais fases minerais identificadas foram quartzo, feldspatos, apatitas e micas. Quanto aos minerais de menor ocorrência, têm-se piroxênios, anfibólios, epidotos, granadas, titanita entre outros. Algumas amostras apresentaram quantidades abundantes de componentes biológicos. Salienta-se que os minerais de interesse econômico não foram encontrados em teores expressivos. A análise da dinâmica sedimentar da área de estudo permitiu concluir que os processos de transporte eólico e fluvial não são eficazes no transporte de materiais de maior densidade. Quanto à dinâmica costeira, a Corrente de Benguela tem a capacidade de homogeneizar e transportar os sedimentos no sentido Sul-Norte, enquanto que relevos submersos permitem a concentração de espécies minerais ou biológicas de forma seletiva.

**Palavras-Chave:** Namíbia. Sedimentos Costeiros. Mineralogia.

## ABSTRACT

Namibia, located in the southwestern portion of Africa, is a country with great extension and geological diversity. Due to its semiarid climate and presence of big desert components, the main economic activities developed are mining and fishing, but also tourism, as a secondary activity. It's also known that great part of its geological setting is composed by several kinds of deposits, and due to that elements such as zinc, uranium and lead are mined. By the environmental point of view, the government of Namibia is looking for interactions between the mines and the biological environment, if there is, or there is not contamination of sediments and biota. To try to understand such interactions, a study about the composition of the immersed sediments of the Namibian coast was made, to verify the presence of minerals that make up the deposits in the coastal area. With these analysis is also possible to make considerations about the efficiency of sedimentary processes of erosion and transport in such unique environment. The samples were taken in the area near the cities of Walvis Bay and Lüderitz, in a total number of 16. Each one of them were separated into two parts, bigger and smaller than 10 $\mu$ m. The samples exhibit small granulometrical variety. The main mineral phases identified were quartz, feldspars, apatites and mica. About the minerals of less quantity, there were identified pyroxenes, amphiboles, epidotes, garnets, titanite and others. Some samples showed large amount of biological components. It's emphasized that the minerals of economic interest weren't found in expressive amounts. The analysis of sedimentary dynamics in the study area lead to conclude that the processes of eolic and fluvial transports are not effective in the transport of material of bigger density. About the coastal dynamic, the Benguela Current has the capacity of homogenize and transport sediments from South to North, and submersed reliefs allow the concentration of mineral or biological species in a selective way.

**Key-words:** Namibia. Coastal sediments. Mineralogy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geográfico de localização da Namíbia e suas principais cidades. A área do território é de 825.615 km <sup>2</sup> .....	6
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Namíbia (extraído de Mendelson <i>et al.</i> (2003). .....	7
Figura 3 - Mapa de relevo da Namíbia (extraído de Projeto Acacia).....	10
Figura 4 - Mapa da rede hidrográfica da Namíbia (extraído e traduzido de Projeto Acacia).....	13
Figura 5 - As diferentes bacias de captação da Namíbia. As setas indicam os tipos de interações entre rios e dunas (extraído e modificado de Strobach, 2008). .....	15
Figura 6 - – Mapa da distribuição dos depósitos minerais inseridos nas bacias de captação da Namíbia.....	18
Figura 7- Mapa textural (A) e composicional (B) da porção norte da costa da Namíbia (extraído e traduzido de Bremner, 1981). .....	29
Figura 8 - Mapa de distribuição de matéria orgânica (A), carbonato de cálcio (B) e foraminíferos plantônicos (C) da costa oeste da África do Sul e Namíbia (extraído e modificado de Rogers & Bremner (1991). .....	30
Figura 9 – (A) Mapa de províncias de argilominerais (extraído e traduzido de Heine <i>et al.</i> , 2010). (B) Distribuições dos argilominerais ao longo da costa inferidas por Heine, (extraído e modificado de Heine <i>et al.</i> , 2010). .....	31
Figura 10 - Mapa de amostragem.....	35
Figura 11 - Esquemática do processo de decantamento. ....	36
Figura 12 - Material após fracionamento granulométrico. À esquerda fração inferior a 10 µm , à direita superior.....	38
Figura 13 - Separador magnético isodinâmico Frantz.....	40
Figura 14 - Difratorômetro de raios X, pertencente ao CPGq do IGEO-UFRGS. ....	47
Figura 15 - (A) Fração superior a 10 µm (aumento 100x) e (B) fração inferior a 10 µm (aumento 100x) .....	50
Figura 16 - MEV-EDS pertencente ao LGI do IGEO-UFRGS. ....	51
Figura 17 - (A) Prensa para confecção de pastilhas, (B) pastilha pronta e (C) microsonda pertencente ao CPGq, do IGEO-UFRGS. ....	54
Figura 18 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	60
Figura 19 - Difratorograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	61

Figura 20 - Grão de quartzo facetado (A), aspecto geral do material floculado (B), grão de diopsídio (C) e imagem aproximada do material floculado (D).....	62
Figura 21 - Aspecto geral da fração argilosa (A) e diferentes tipos de diatomáceas (B). .....	63
Figura 22 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	64
Figura 23 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	65
Figura 24 - Espícula de esponja (A) e fragmentos de diatomáceas (B). ....	66
Figura 25 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e fragmentos de diatomáceas placóides (B).....	66
Figura 26 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	67
Figura 27 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	69
Figura 28 - Aspecto geral da amostra (A) e detalhe de grão de glauconita (B). ....	70
Figura 29 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e detalhe para forma de ocorrência de argilominerais (B).....	70
Figura 30 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	71
Figura 31 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	73
Figura 32 - Grão de feldspato com bioerosão (A), detalhe de argilominerais em cavidade (B) e apatita com hábito distinto (C). ....	74
Figura 33 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A), microrganismo esférico (B) e cristais de argilominerais (C).....	75
Figura 34 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	76
Figura 35 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	77
Figura 36 - Fragmentos de dentes de organismos marinhos (A) e grão esférico de apatita (B).....	78
Figura 37 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e cocólitos (B). ....	78
Figura 38 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	79

Figura 39 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	81
Figura 40 - Grãos angulosos de minerais variados(A) e piroxênio (B).....	82
Figura 41 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm . .....	82
Figura 42 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	83
Figura 43 - Difratoograma da amostra. ....	84
Figura 44 - Grão prismático de anfibólio (A) e de glauconita (B). ....	85
Figura 45 - Fração de tamanho superior a 60 µm (A) e inferior (B). ....	85
Figura 46 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	87
Figura 47 - Grão esférico de apatita (A) e apatita com inclusões de zircão (B).....	88
Figura 48 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm. ....	88
Figura 49 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	89
Figura 50 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	91
Figura 51 - Grão de anfibólio (A), grão de feldspato recoberto por minerais micáceos (B) e grão prismático de piroxênio (C).....	92
Figura 52 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e visão de detalhe dos fragmentos de diatomáceas (B). ....	93
Figura 53 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. Fragmento de escama em aumento de 100 x (C). ....	94
Figura 54 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados. ....	95
Figura 55 - Fragmento de escama.....	95
Figura 56 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A), imagens de detalhe (B e C), evidenciando parede de diatomácea (D).....	96
Figura 57 - Aspecto geral da amostra vista em lupa.....	97
Figura 58 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	98
Figura 59 - Grão de mineral micáceo (A) e apatita (B).....	99
Figura 60 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e detalhe de diatomáceas (B). ....	99

Figura 61 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. Variedade de minerais micáceos (C).....	100
Figura 62 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	102
Figura 63 - Minerais micáceos (A), grão de quartzo a esquerda e feldspato a direita (B) e grão de piroxênio (C).....	103
Figura 64 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm . ....	104
Figura 65 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	105
Figura 66 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	106
Figura 67 - Floco mineral em detalhe.....	107
Figura 68 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e diatomácea com fragmento de radiolária (B).....	107
Figura 69 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	108
Figura 70 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	109
Figura 71 - Grão prismático de apatita (A), prismático de piroxênio (B) e quartzo facetado (C). ....	110
Figura 72 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm . ....	110
Figura 73 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. Foraminíferos de diversas colorações (C).....	112
Figura 74 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	114
Figura 75 - Apatita arredondada (A) e detalhe nos planos de crescimento de conchas (B).....	114
Figura 76 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm . ....	115
Figura 77 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. ....	116
Figura 78 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 µm (B).....	117
Figura 79 - Grãos arredondados de feldspatos (A) e grão facetado de quartzo (B). ....	118
Figura 80 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm . ....	118
Figura 81 - Padrão de crescimento coloidal em apatita. Grãos de sulfetos em tonalidade branca e cavidades em tonalidade preta. ....	123

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Principais divisões geológicas da Namíbia (extraído e traduzido de Mendelson <i>et al.</i> (2003).....	8
Quadro 2 - Principais eventos geológicos e suas expressões no relevo da Namíbia Mendelson <i>et al.</i> (2003).....	9
Quadro 3 - Características dos minerais de urânio e suas ocorrências (modificado e traduzido de Roesener & Schreuder (2005). ....	22
Quadro 4 - Quantidades relativas de argilominerais distribuídas nas quatro províncias consideradas neste trabalho (extraído, modificado e traduzido de Heine <i>et al.</i> , 2010)..	32
Quadro 5 - Quantidades relativas de argilominerais em solos adjacentes aos rios Omaruru, Swakop e Kuiseb (extraído e traduzido de Heine <i>et al.</i> , 2010).....	32
Quadro 6 - Classes minerais e suas características.....	58
Quadro 7 - Classificação mineral simplificada.....	59

**LISTA DE ABREVIACOES**

*BSE* – elétrons retro-espalhados (*backscattered electrons*)

CPGq – Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica

*EDS* – espectrometria por dispersão em energia (*Energy Dispersive Spectrometry*)

ETR e ETRL – elementos terras raras e elementos terras raras leves

IAEA – *International Atomic Energy Agency*

IGEO – Instituto de Geociências

*IUGS* – *International Union of Geological Sciences*

kHz – quilohertz

kV – quilovolts

Ma – milhões de anos

MEV – microscópio eletrônico de varredura

$\mu\text{m}$  – micrmetros

nm – nanmetros

ppm- partes por milhão

ppt – partes por trilhão

SE – elétrons secundários (*Secondary Electrons*)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*WDS* – espectrometria por dispersão em comprimento de onda (*Wavelength Dispersive Spectrometry*)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E HIPÓTESES .....	1
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
1.3	OBJETIVOS E METAS.....	3
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE E CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.2	GEOLOGIA DA NAMÍBIA .....	6
2.3	FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS DA NAMÍBIA .....	9
2.4	DEPÓSITOS MINERAIS DA NAMÍBIA .....	17
2.5	ÁREA DE ESTUDO - REGIÃO COSTEIRA.....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO .....</b>	<b>33</b>
3.1	AMOSTRAGEM .....	33
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS - FRACIONAMENTO .....	35
3.3	ANÁLISE MINERALÓGICA MACROSCÓPICA EM ORTOSCOPIA .....	41
3.4	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX).....	42
3.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV).....	48
3.6	ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) .....	52
3.7	MICROSSONDA ELETRÔNICA (ME) .....	53
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>56</b>
4.1	AMOSTRA 20010 .....	59
4.2	AMOSTRA 23002 .....	63
4.3	AMOSTRA 23070 .....	67
4.4	AMOSTRA 26010 .....	70
4.5	AMOSTRA 26050 .....	75
4.6	AMOSTRA LAG .....	78
4.7	AMOSTRA LUDHC.....	83
4.8	AMOSTRA LUDH .....	85
4.9	AMOSTRA SWB.....	89
4.10	AMOSTRA WBH.....	93
4.11	AMOSTRA WBHC .....	96
4.12	AMOSTRA ZZ1 .....	100
4.13	AMOSTRA ZZ3 .....	104
4.14	AMOSTRA ZZ7 .....	108
4.15	AMOSTRA ZZ8 .....	111
4.16	AMOSTRA ZZ9 .....	115
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES .....</b>	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>127</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>131</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

A Namíbia tem como segunda principal atividade econômica a mineração, o que significa que grande parte do seu território é minerado para extração dos mais diversos materiais para exportação. Entretanto, a pesca é considerada a principal atividade econômica do país, o que levou o governo da Namíbia a procurar uma possível influência da mineração sobre a atividade pesqueira. Para isso criou-se um convênio entre o governo e a IAEA, para o estudo da região costeira nas esferas geológica, biológica e social. O presente trabalho está inserido neste projeto e tem como objetivo o estudo dos sedimentos da costa. A variabilidade mineral do país é um reflexo direto da grande diversidade geológica da região, e é a partir desta característica que busca-se o entendimento do transporte efetivo dos sedimentos.

Devido ao seu clima semi-árido, a Namíbia apresenta características climáticas que muito se diferenciam das encontradas no território brasileiro. A partir da integração e entendimento das mais diversas formas de sedimentação de um ambiente como este, é possível tentar prever a composição sedimentar a costa namibiense a partir do estudo da rede de drenagem e geologia local. Porém, mesmo com esse conhecimento indagações podem ser desenvolvidas no que diz respeito à quantidade de material que pode efetivamente chegar até a linha de costa, quando proveniente das porções mais interioranas do país.

### **1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E HIPÓTESES**

Principalmente durante a década de 80, a extração de urânio e demais materiais secundários foi uma das principais atividades econômicas da Namíbia. Atualmente, minas de chumbo, cobre, estanho e ouro são as que representam maior atividade. O que está sendo questionado neste trabalho é a capacidade de materiais provenientes destas minas, e de outros locais com grandes depósitos minerais, estarem sendo transportados como sedimentos até o oceano, pois sabe-se que um enriquecimento demasiado na água oceânica pode afetar a cadeia trófica dos peixes, assim gerando um problema ambiental de grande amplitude.

Os rios que percolam o interior do país são todos efêmeros, alguns de maior carga hídrica, outros de menor, porém todos efêmeros. Já no que diz respeito aos seis rios que delimitam o território do país, são todos perenes, porém não exercem tanta contribuição

na carga sedimentar da costa como um todo, visto a grande extensão da linha de costa. Também se deve considerar que a Corrente de Benguela promove movimentação das águas no sentido sul para norte, de forma que os sedimentos apresentam transporte lateral para norte muito considerável.

Tendo em vista essas características, apresenta-se o questionamento deste trabalho - de que são compostos os sedimentos, trazidos por rios efêmeros que percolam grandes depósitos minerais? Expandindo o olhar para os problemas ambientais que podem ser vinculados a minas mal gerenciadas, procura-se saber a composição mineralógica e química dos sedimentos encontrados na porção superficial da costa, ou seja, se existem elementos pesados, tóxicos ou se tudo está em perfeito equilíbrio e, em caso afirmativo, que minerais alojam esses elementos tóxicos. Dentre as diversas possibilidades existentes, considera-se como hipótese o fato de que existe sim um transporte efetivo do continente para o oceano, que se dá principalmente pelo transporte de sedimentos que alojam os elementos em questão. Desta forma, considera-se que o intemperismo físico é proeminente e que os rios efêmeros, mesmo inconstantes e de carga muito variável, podem sim transportar grandes quantidades de material por longos trajetos, mesmo com a presença de relevo acentuado e grandes campos de dunas no caminho. Neste caso, essa afirmativa seria comprovada a partir da análise mineralógica e geoquímica do sedimento.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo dos sedimentos da costa da Namíbia é a contribuição deste trabalho para o projeto firmado entre o governo namibiense e a IAEA. O produto deste trabalho é o conjunto de dados sobre a mineralogia e a química mineral, bem como componentes biológicos presentes no sedimento.

Através do estudo dos sedimentos da costa da Namíbia, muitas serão as possibilidades de expansão de conhecimentos, e são esses caminhos que fazem desse trabalho um estudo amplo e de diversas aplicações. Contribuições científicas serão obtidas com o estudo metodológico e comparativo dos componentes sedimentares e elementares do material, podendo ao fim deste trabalho sabermos qual será o melhor método para esta finalidade. Também é possível ampliar o estudo a fim de entendermos os mecanismos de transporte dos sedimentos provenientes das minas, por *flash floods*, cursos constantes d'água, lençol freático, entre outros.

Ampliando o estudo para esfera social e econômica, se podem encontrar diversas utilidades. Quando analisadas as possibilidades de expansão deste trabalho, pode-se notar que estudos ambientais mais profundos podem ser realizados. Por exemplo, caso os sedimentos não apresentem qualquer tipo de material tóxico, por que isso não ocorreu sendo que na região próxima à costa existem grandes minas de urânio? E caso haja sim material pesado nos sedimentos, como este foi transportado até lá? Questões como essa abrem portas para uma revisão minuciosa da legislação mineral do país, pois, dependendo do resultado, implicações negativas ocorrerão.

### **1.3 OBJETIVOS E METAS**

Este trabalho tem como objetivo geral investigar a capacidade de transporte sedimentar em ambientes semiáridos, visando encontrar materiais que relacionem-se aos grandes depósitos minerais que encontram-se na região da Namíbia. Para isso, os objetivos específicos do trabalho são a caracterização mineralógica e geoquímica mineral dos sedimentos. Como já mencionado, os resultados deste estudo podem propiciar diversas discussões, dependendo do produto final. Sendo assim, espera-se que questões sobre legislação e cuidados com minas em atividades, e desativadas, sejam levantadas a fim de não somente questionar, mas impulsionar dúvidas que um dia possam se reverter em mudanças efetivas naqueles tópicos que representam problemas.

## **2 ESTADO DA ARTE E CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para tornar possível o conhecimento da relação entre as rochas do embasamento geológico da Namíbia e os sedimentos presentes na costa, um estudo detalhado foi realizado a fim de compreender o que se deve esperar de carga sedimentar vinda do continente. Porém, devido à extensão territorial do país (Figura 1), assumiu-se que o conhecimento detalhado sobre todas as suas rochas é de difícil aquisição. De forma a tornar este trabalho viável, alguns métodos de decisão quanto à relevância do estudo de determinadas formações foi desenvolvido.

A principal característica para se traçar uma relação entre o continente e o oceano é a composição mineralógica dos sedimentos. Similar a um estudo de proveniência, a mineralogia de continente deve ser refletida no oceano caso o transporte sedimentar seja efetivo. Como não foram realizados estudos de datação isotópica, a análise de minerais formadores de rocha não foi efetiva, visto que eles estão presentes em diversas unidades do território. Sendo assim, optou-se por analisar as fases minerais que são consideradas incomuns e de ocorrência restrita. Para delimitar esta mineralogia o estudo dos principais depósitos minerais foi realizado. Desta forma pode-se delimitar regiões com maior probabilidade de se localizar determinados minerais.

A etapa inicial deste levantamento de dados foi a identificação dos rios que percolam a região. No caso da Namíbia existem tanto rios perenes quanto efêmeros, e a identificação dos principais deste segundo tipo é muito importante. Não são levados em conta todos os rios efêmeros, pois são os maiores que tem grande aporte sedimentar e relativa sazonalidade de carga. Como se busca encontrar quantidades significativas de materiais que foram transportados por muitos quilômetros, a probabilidade de um rio pequeno que raramente se recarrega os transportar é pequena.

A segunda etapa foi a identificação das bacias de captação de cada um dos grandes rios efêmeros. Esta é a área na qual rios efêmeros de maior ordem interligam-se até comunicarem-se com o rio efêmero de primeira ordem, que consiste naquele que irá chegar ao oceano. Ou seja, a bacia de captação delimita a área que influencia na composição dos sedimentos que o rio carrega.

Posteriormente foram analisados os depósitos localizados na região. Para cada bacia de captação existe uma série de depósitos minerais que influenciam na composição sedimentar, e portanto mineralogia acessória/incomum provável de se encontrar. Foi a partir deste dado que foi possível inferir quais minerais podem ser encontrados em cada ponto amostrado na costa.

Como forma de facilitar a identificação dos minerais desejados, realizou-se a etapa de reconhecimento de grandes depósitos e minas, sejam a céu aberto ou subterrâneas. A importância desta etapa consiste no conhecimento de que em determinadas áreas a presença de minerais incomuns é positiva e em quantidade significativa, pois os depósitos são considerados economicamente viáveis. Sendo assim, pode-se estimar quais minerais são mais prováveis de serem encontrados, tendo em vista a sua abundância. Especial atenção foi tomada no que diz respeito aos minerais de urânio, visto sua grande importância em relação a radioatividade e impacto ambiental.

A última etapa de levantamentos bibliográficos referentes à descrição de probabilidade de fases minerais foi o estudo dos padrões de chuvas e aporte sedimentar dos grandes rios efêmeros. A busca de padrões e descoberta da quantidade que cada rio pode transportar mostra quais tem maior capacidade de transportar o material do continente até o oceano. Porém, deve-se levar em conta que devido ao clima semiárido e ao estudo recente (a coleta periódica de dados referentes a pluviosidade dos rios foi iniciada em alguns rios a cerca de 30 anos), encontrar este tipo de dado é relativamente difícil, seja pela sua inexistência ou falta de publicações.

Ao final deste levantamento o que se obteve foi o conhecimento quanto as prováveis regiões com maior concentração de determinados tipos minerais. A partir deste dado pode-se guiar o estudo das fases minerais nos demais métodos, como difratometria de raios X e espectrometria de energia dispersiva.

Todos os dados referentes à localização dos rios, bacias de captação, geologia e depósitos minerais foram retirados do banco de dados do projeto *Atlas of Namibia Project*, uma parceria entre a *University of Cologne* e *Ministry of Environment and Tourism of Namibia*. As indicações das grandes minas foram retiradas da publicação “2013 *Minerals Yearbook-Namibia* (USGS)” e “*Mining Journal No. 8450*”.

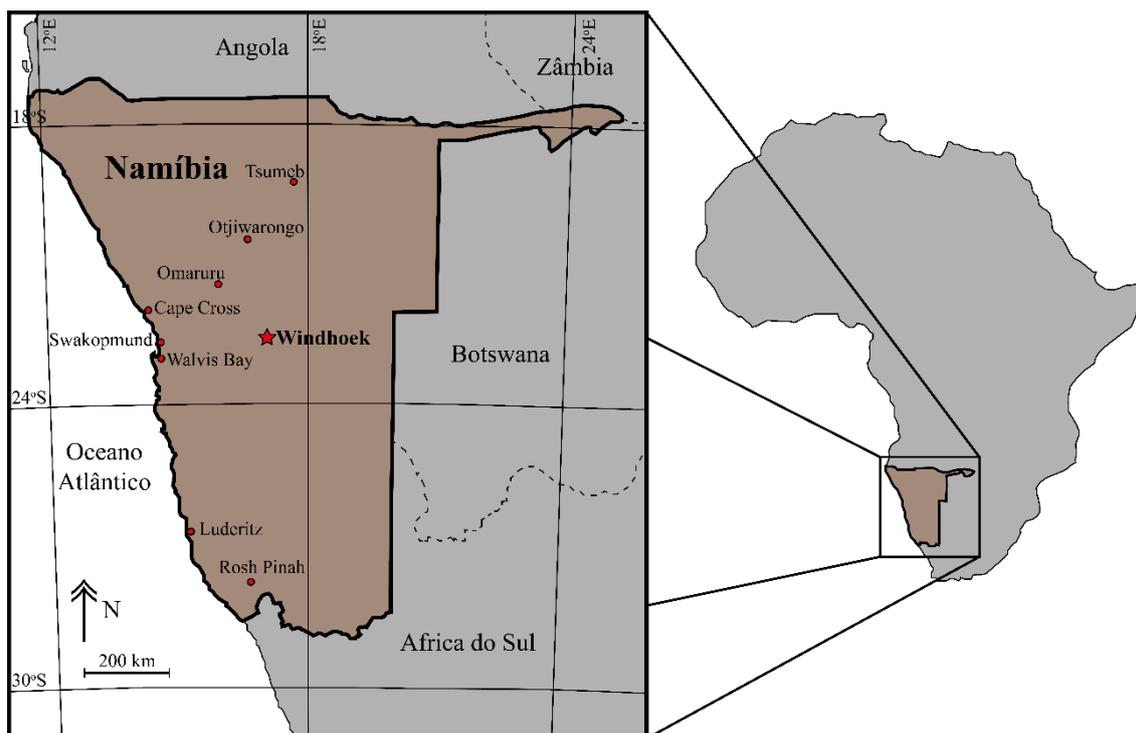


Figura 1 - Mapa geográfico de localização da Namíbia e suas principais cidades. A área do território é de 825.615 km<sup>2</sup>.

## 2.2 GEOLOGIA DA NAMÍBIA

A geologia da Namíbia pode ser subdividida, de modo amplo, em duas principais divisões, que podem ser claramente vistas a partir de feições de relevo. Tem-se a porção oeste do país, que apresenta em sua maior parte feições de relevo como vales, escarpamentos e montanhas, consequência da complexidade geológica da área. Neste caso, sabe-se que esta porção do país apresenta rochas de maior idade e maior variabilidade composicional e de origem. Já a segunda divisão é a partir da parte leste do país, que tem como característica a Bacia do Kalahari e predominância de processos de acúmulo sedimentar. Neste caso, o material geológico ali encontrado é relativamente recente e é composto principalmente por sedimentos.

A partir da análise do mapa geológico da Namíbia, publicado por *Mendelson et al.* (2003) é possível verificar este padrão de ocorrência de rochas. Foram realizadas subdivisões entre as principais unidades geológicas da região, que podem ser verificadas na Figura 2. Juntamente tem-se o Quadro 1 que apresenta a nomenclatura e rochas que compõem cada uma destas unidades, e o Quadro 2, que relaciona os principais eventos geológicos que atuaram para a formação da geologia local e suas relevâncias na paisagem.



Idade (Ma)	Principais divisões geológicas	Grupo	Litologia	Legenda
70-presente	Grupo Kalahari	Arenitos do Kalahari e Namib	Arenito	1
137-132	Província Ígnea de Damaraland	Intrusões Ígneas	Calcário e arenito	2
		Grupo Etendeka	Arenito	3
300-180	Supergrupo Karoo	Diques e sills	Vulcânica	4
		Basaltos de Kalkrand	Basalto	5
		Bacia de Huab	Arenito e folhelho	6
		Bacia de Karoo	Arenito e folhelho	7
		Bacia de Waterberg	Conglomerado	8
600-543	Grupo Nama	Subgrupo Fish River	Arenito	9
		Subgrupo Kuibis e Schwarzrand	Arenito e conglomerado	10
650-470	Intrusões Graníticas de Damara	Granitos de Damara	Granitos	11
850-600	Supergrupo Damara e Complexo Gariiep	Complexo Gariiep	Complexo	12
		Grupo Hakos	Arenito	13
		Grupo Khomas	Xisto	14
		Montanhas de Naukluft	Calcário e folhelho	15
		Grupo Witvlei	Calcário e arenito	16
		Grupo Swakop	Xisto	17
		Grupo Otavi	Calcário	18
1,400-1,050	Complexo Metamórfico de Namaqua e rochas relacionadas	Granitos Associados de Gamsberg	Granitos	19
		Complexo Metamórfico de Namaqua	Complexo	20
		Grupo Sinclair e equivalentes	Complexo	21
2,600-1,650	Rochas mais antigas	Grupo Rehoboth e associadas	Complexo	22
		Complexo Metamórfico Grootfontein	Complexo	23
		Complexo Metamórfico de Epupa, Huab e Abbabis	Complexo	24
		Suíte Granítica de Fransfontein	Granitos	25
		Grupo Khoabendus e Formação Okapuka	Riolito e arenito	26
		Suíte Granítica de Vioolsdrift	Granitos	27
		Grupo Haib	Gneisse	28
		Complexo Kunene	Complexo	29

Quadro 1 - Principais divisões geológicas da Namíbia (extraído e traduzido de Mendelson *et al.* (2003).

Idade (Ma)	Evento Geológico	Relevância nas paisagens
2.600	Rochas mais antigas da Namíbia	Vale do Kunene
1.400-1.500	Complexo metamórfico de Namaqualand	
850	Rompimento do Rodinia	
850-600	Supergrupo Damara e Complexo Gariep	Calcários e dolomitos de Otavi
650	Intrusões graníticas de Damara	
550	Formação do Gondwana	
300-180	Supergrupo Karoo	
180	Rifteamento do Gondwana	Arenitos de Etjo, Platô de Waterberg e Twyfelfontain
135-120	Término do rifteamento do Gondwana; Erupção dos flood basalts de Etendeka; Intrusão dos complexos ígneos de Damaraland e diques doleríticos	Etendeka, Brandberg, Spitzkoppe e Erongo
80-75	Formação de Bukkaros	
26	Arenito Tsondab	Calcretes e Namib Sand Sea
11.8	Intensificação da surgência da Corrente de Benguele	
7-5	Lago Kunene	Etosha Pan
2.5	Início do Quaternário e glaciação de meia-latidade, intensificação da aridez na Namíbia	Siltos Homeb, Sossus Vlei, Naukluft tufas, Koes Pan e Dunas Lineares
0.01	Início do Holoceno	Dunas Barchan e Fairy Cycles

Quadro 2 - Principais eventos geológicos e suas expressões no relevo da Namíbia Mendelson *et al.* (2003).

### 2.3 FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS DA NAMÍBIA E DEMAIS CARACTERÍSTICAS DE CLIMA E SOLO

#### *Os campos de dunas*

Existem dois grandes desertos na Namíbia, o Kalahari, localizado na porção leste do território, e o Namib, localizado ao Oeste. Ambos possuem grande extensão, impacto no relevo e na dinâmica sedimentar da região. A feição geológica que os separa é o *Great Escarpment*, que inicia em Moçambique e estende-se até Angola, e que na Namíbia age como divisor de relevo, que é caracterizado como baixo ao Oeste quando comparado ao relevo de platô localizado ao Leste. Tal relação de relevo pode ser observada na Figura 3 (altitudes acima de 2001m). Este escarpamento pode chegar até 2.347 m e compõe montanhas como as de Naukluft (Mvondo *et al.* 2011). Na porção

namibiense, esta feição é composta por granitos sobrepostos por arenitos silicificados da Formação Etjo (Moon & Selby 1983).

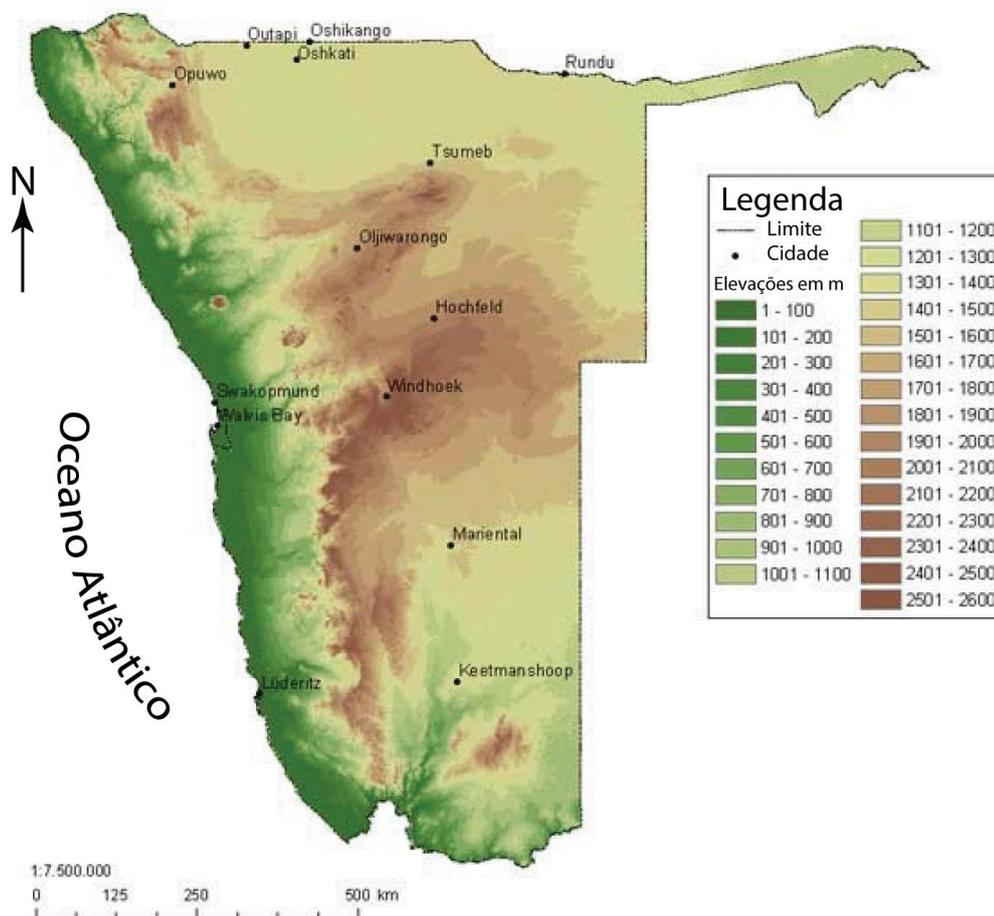


Figura 3 - Mapa de relevo da Namíbia (extraído de Projeto Acacia).

De acordo com Goudie (2015), o *Namib Desert* constitui uma zona de características desérticas que estende-se por mais de 2000 km ao longo da costa da Angola, Namíbia e África do Sul e apresenta largura que máxima de 200 km. Apresenta diversos tipos de paisagens: *Transitional Namib*, composto pelas Dunas Obib, *yargdangs* (ver próxima página), e estruturas de deflação. *Namib Sand Sea*, que é um campo de dunas que se estende pela costa de Lüderitz até Walvis Bay. *Central Namib Plains*, composto por zona de baixo relevo, com clima hiper-árido e alguns canais secos de rios efêmeros. *Northern Namib* e *Skeleton Coast*, caracterizado por elevações na forma de morros de composição arenítica e vulcânica. Dentre estas paisagens, as que representam maior importância para este trabalho são *Namib Sand Sea* e *Skeleton Coast*, devido à sua proximidade da costa.

O *Namib Sand Sea*, que faz parte do *Namib Desert*, consiste em uma área de cerca de 34.000 km<sup>2</sup> composto por dunas de diversos tipos e de grande porte que, segundo estudos de Vermeesch *et al.* (2010), levaram milhões de anos para se formar, devido a quantidade excessiva de material arenoso ali acumulado. A tonalidade das areias que formam tais feições de relevo foi alvo de estudos de White *et al.* (1997), onde através de uma análise indireta realizada por *Landsat Thematic Mapper Data* foi possível identificar padrões nas formas e composição destes corpos de dunas das proximidades da cidade de Walvis Bay. Dentre os diversos fatores apontados para variação de tonalidades, a importância das diferentes proveniências de cada região de dunas foi ressaltada como principal ferramenta de controle composicional. Também se resalta o papel do transporte e abrasão em tais sedimentos, visto que grande diversidade de rochas sedimentares possuem óxidos de ferro como cimentos naturais. Neste caso, quanto maior o transporte por abrasão de cada grão, menores as chances de preservação das coberturas de óxidos.

Associadas às dunas também são encontrados *yargdangs*. Esta estrutura é típica de ambientes áridos e semi-áridos e pode ter tamanhos que variam de alguns metros até alguns quilômetros. São protuberâncias geradas a partir da erosão de rochas de maior resistência e comumente preservam a direção do vento que as erodiu. No caso daqueles preservados na costeira a região sul da Namíbia, estudos de Goudie (2015) demonstram que entre o *Namib Sand Sea* e o Rio Orange existe uma zona hiper-árida com a presença de mega *yardangs* de cerca de 20 km de extensão por 1 km de largura e que podem chegar até 100m de altura. Estas feições também são identificadas nas proximidades das cidades de Lüderitz, Pomona e Chamais Bay.

A *Skeleton Coast*, localizada na porção norte da costa namibiense, consiste em uma área desértica com ocorrência de dunas alinhadas em sentido norte-sul. Estas dunas apresentam tamanho inferior às aquelas do *Namib Sand Sea* e diferentemente deste anteriormente citado, apresentam uma série de rios efêmeros que as atravessam. O detalhamento desta relação entre processos eólicos e fluviais é detalhado por Krapf *et al.* (2003) e será discutido no item de hidrografia deste capítulo.

Quanto ao deserto do Kalahari, estende-se pela região central da Namíbia e Botswana (Thomas & Shaw, 1991), sendo que na porção namibiense localiza-se em altitude de cerca de 1000m. Devido a sua localização a leste, recebe quantidades baixas,

porém significantes, de chuva anualmente. Tal pluviosidade confere à região o caráter de semiárido a subsumido, contrastando com o deserto Namib, que varia de árido a superárido. Dentre as principais características sedimentares da região, tem-se predominância de dunas lineares, sendo compostos por conglomerados, arenitos, argilominerais, calcretes, silcretes e depósitos de interdunas com diatomáceas (Wanke & Wanke 2007).

#### *Os rios e as redes hidrográficas*

Ao total somam-se sete rios de fluxo contínuo no território namibiense, todos os demais rios que permeiam o país são considerados efêmeros e sazonais. Destes sete rios, dois destacam-se por sua significância, sendo eles o Rio Kunene, que bordejia a região norte do país e origina-se em Angola, e o Rio Orange, que delimita a porção sul do país e origina-se na África do Sul. Os demais rios perenes encontram-se no nordeste extremo do país, sendo eles os rios Okavango, Kwando, Linyanti, Chobe e Zambezi. As razões pelas quais estes rios se mantêm perenes, mesmo que localizados em zonas semiáridas, se dá pelo seu início em regiões mais úmidas, como as zonas de maior altitude localizadas ao Leste, que tem a característica de receber maiores e mais frequentes cargas d'água do que a porção oeste. Todos os rios tem seu curso iniciado em Angola, Zâmbia ou África do Sul. Como forma de demonstrar essa diferença pluviométrica entre as zonas leste e oeste, pesquisas realizadas pelo *Department of Water Affairs – Namibia* demonstram que rios localizados ao Nordeste apresentam pluviosidade entre 300 e 600 mm ao ano, enquanto que rios localizados ao Sudoeste não ultrapassam o nível de 100 mm anuais.

Quanto aos rios efêmeros, descritos no por Jacobson *et al.* (1995), ocorrem em grande quantidade, principalmente na região oeste do país, que consiste também em região de relevo mais baixo e mais propício para o escoamento sedimentar, visto a presença do oceano. Dentre os rios efêmeros, alguns destacam-se por seu porte e extensão, como os Rios Ugab, Swakop, Omatako, Nossob e Fish. Outros, como Kuiseb (Figura 4), podem permanecer anos sem serem reabastecidos e apresentarem dificuldade para chegar ao oceano (Stone *et al.*, 2010). Esta dificuldade pode se dar por barreiras físicas, como a presença de dunas, pela taxa de evaporação e também de infiltração da água, principalmente em solos secos e porosos, característicos da região (Strobach, 2008).

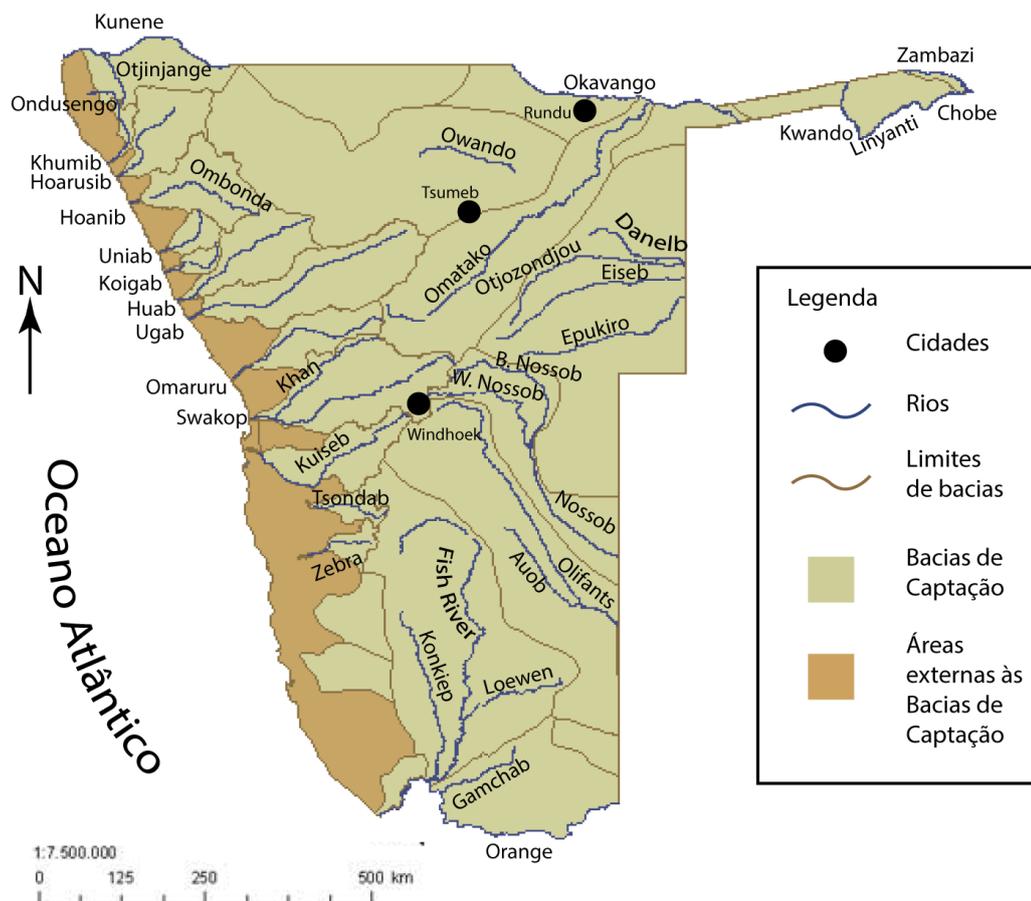


Figura 4 - Mapa da rede hidrográfica da Namíbia (extraído e traduzido de Projeto Acacia).

Por serem rios efêmeros, suas capacidades de transporte e dimensões são muito variáveis e são controladas principalmente pelo relevo, taxa de infiltração, taxa de evaporação e magnitude da descarga d'água. O fenômeno que age como um reativador destes rios é chamado de *flash flood*. Este fenômeno consiste em enchentes repentinas que podem transportar grandes cargas sedimentares, por estarem diretamente relacionadas a grandes descargas d'água. A durabilidade das chuvas que o originam pode variar entre algumas horas até alguns dias, dependendo das condições climáticas.

Garzanti *et al.* (2014) fizeram estudos sobre o transporte de sedimentos dos principais rios da Namíbia e constataram que todos os rios que se encontram entre os rios Orange (ao Sul) e Kunene (ao Norte) são efêmeros e são caracterizados por reativação esporádica por tempestades durante o verão ou por chuvas na região de montanhas. As enchentes, dependendo da localidade, costumam ocorrer com intervalo de vários anos e são de grande magnitude, alagando extensas áreas e tendo duração de alguns dias. Porém, os únicos rios que contribuem efetivamente para o acúmulo sedimentar no oceano são aqueles localizados na região de Erongo (na *Skeleton Coast*),

onde não existem campos de dunas. Devido ao fato de Walvis Bay localizar-se no *Namib Sand Sea*, pode-se então dizer que os rios Swakop e Kuiseb tem moderada influência no quesito de transporte dos sedimentos das regiões altas.

Os trabalhos de Krapf (2003) e Krapf *et al.* (2003) definiram cinco tipos de interações entre rios efêmeros e dunas a partir do estudo dos rios Koigab, Uniab, Hunkab, Hoanib e Hoarusib. O Tipo 1 (Rio Koigab) com ausência de barreiras geradas pelas dunas, de forma que o rio segue seu curso sem dificuldades, assim provendo sedimento para o oceano. O Tipo 2 (Rio Uniab) apresenta uma relação onde as dunas geram uma barreira linear, porém de tamanho e espessura limitada. Desta forma, quando eventos de enchentes ocorrem o rio apresenta força suficiente para romper esta barreira e chegar ao oceano. No Tipo 3 (Rio Hunkab) as dunas geram uma barreira mais forte e que só é rompida em enchentes de grande porte, portanto este rio, localizado entre Uniab e Hoanib, raramente leva seu sedimento até a costa. No caso do tipo 4 (Rio Hoanib), o processo é similar ao tipo 3, com exceção de que o rompimento das dunas é muito mais raro, ocorrendo em intervalos que variam de 5 a 10 anos (Eitel *et al.*, 2006). Quanto ao Tipo 5 (Rio Hoarusib), a corrente do rio é relativamente mais constante e consegue suprimir o avanço das dunas. Nestas regiões adjacentes aos rios tem-se o desenvolvimento de vegetação devido a presença de umidade.

As principais bacias de captação localizadas na Namíbia foram mapeadas segundo trabalho de Strobach (2008). É possível verificar que apesar da grande quantidade de bacias localizadas na porção oeste do território, poucas são aquelas que efetivamente conectam-se ao Oceano Atlântico, como pode ser visto na Figura 5. São elas, em ordem decrescente de área: Orange, Ugab, Swakop, Kuiseb, Huab, Hoanib, Hoarusib, Kunene, Omaruru, Uniab, Koigab, Khumib, Messum. Todas estas áreas, exceto a referente ao Rio Orange, localizam-se na zona costeira ao Norte de Walvis Bay. Tal padrão de ocorrência das bacias se dá pela presença de obstáculos no relevo, como é o caso do *Namib Sand Sea*, que impede o desenvolvimento de longos cursos d'água até o oceano.

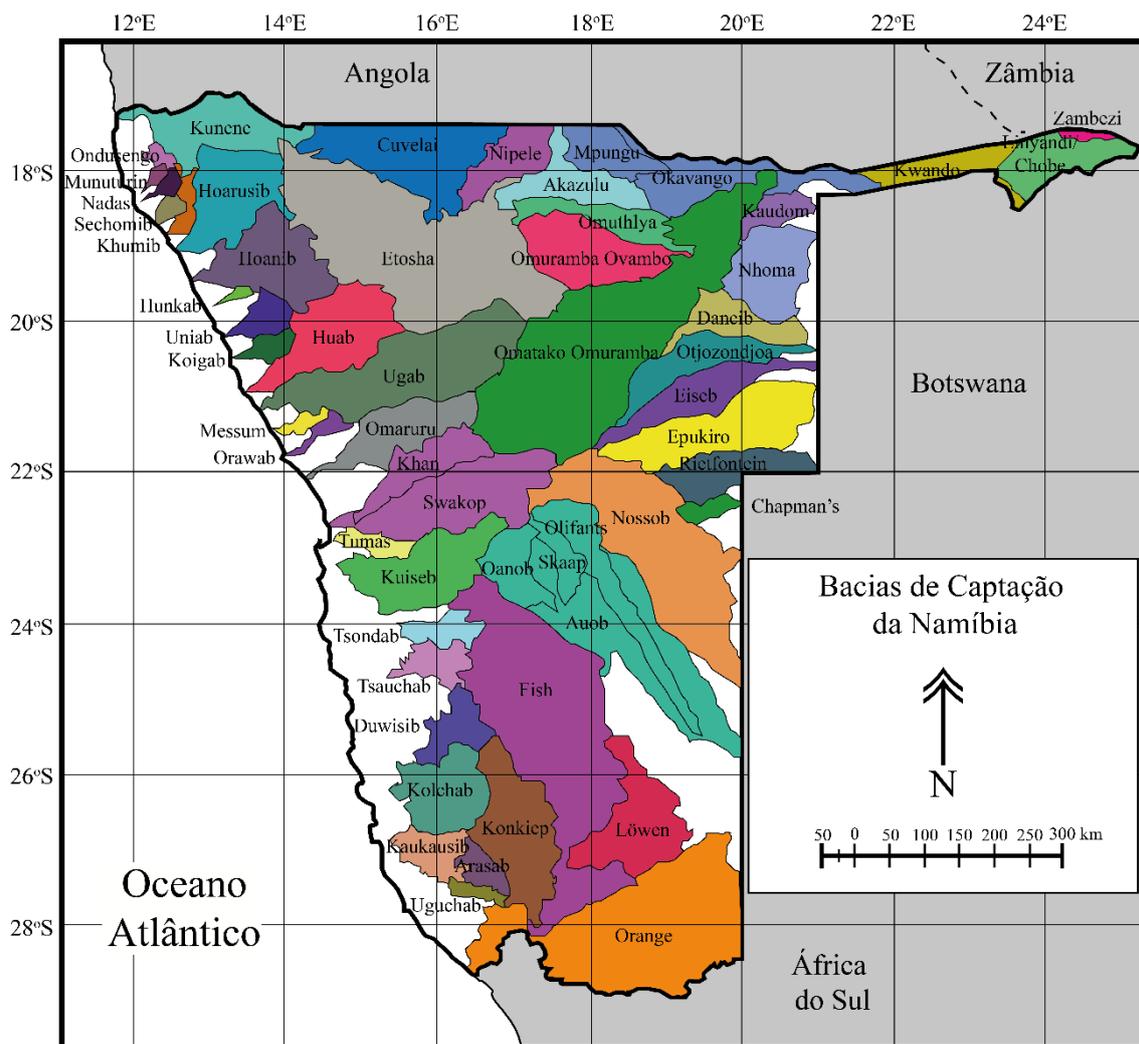


Figura 5 - As diferentes bacias de captação da Namíbia. As setas indicam os tipos de interações entre rios e dunas (extraído e modificado de Strobach, 2008).

### *O Clima*

A ausência de chuvas e de pouca umidade do território namibiense se dá pelo fato de o clima ser considerado semiárido. Existem dois principais trajetos por onde as massas úmidas e quentes podem se direcionar à Namíbia: (1) provenientes do norte da África, acima do Equador, onde ao deslocar-se para sul perde grande parte de sua umidade na zona equatorial e; (2) provenientes do Oceano Índico, carregadas de umidade e calor que, ao chegar na porção leste da Namíbia encontra massas de ar frio e seco, além de grandes escarpamentos que agem como barreira climática, o que impede o fluxo para oeste antes seguido. A conjunção de todos os fatores climáticos por vezes ocasiona períodos de secas severas em algumas regiões. Assim como as chuvas, que tem ampla variabilidade de carga e duração, esses períodos podem perdurar por meses ou até mesmo anos, o que afeta diretamente a vida vegetal, animal e dinâmica

intempérica. Outra característica climática é a de que existe um período em que se esperam chuvas, no caso entre os meses de outubro e maio, sendo os maiores volumes durante o verão (Jacobson *et al.*, 1995)

Outros fatores que influenciam diretamente no clima são a presença da Corrente Oceânica de Benguela e do anticiclone Sul-Atlântico, que dão à região costeira características distintas daquelas presentes na porção interiorana do país. Exemplifica-se com o fato de haver temperaturas mais baixas, maior humidade, ventos mais fortes e presença de névoa. As principais características da Corrente de Benguela são sua movimentação de sul para norte, devido ao anticiclone, que traz consigo águas gélidas do sul do Oceano Atlântico, que permanecem frias ao chegar à costa da Namíbia. Devido a esta temperatura é possível gerar humidade suficiente para formação de névoa, mas não o suficiente para formar nuvens carregadas de umidade e assim formar chuvas. Além de interferir no sistema de chuvas, a Corrente de Benguela também tem influência direta sobre a temperatura, conferindo à região costeira as temperaturas mais baixas do território da Namíbia, e mais baixas em relação a localidades de mesma latitude ao redor do mundo. Sendo assim, tem-se uma gradação de oeste para leste quanto, iniciando com médias de 16°C e indo até mais de 22°C (Mendelson *et al.*, 2003).

#### *O Solo e o Intemperismo*

Segundo Jacobson *et al.* (1995), os solos do país possuem variabilidade composicional, porém algumas características físicas se mantêm ao longo do território. Por decorrência da escassez de chuvas, muito comumente se tem feições de “craquelamento” no solo, o que ocasiona grande permeabilidade de fluídos. Tem-se como exemplo do mecanismo de infiltração decorrente das secas o Rio Swakop, onde na sua extremidade leste, a aproximadamente 300 km da costa, a pluviosidade é de mais de 400 mm/ano, e no extremo oeste, a 50 km da costa, a pluviosidade é de 20 mm/ano, sendo os valores de transição entre essas distâncias muito gradual. Sendo assim, pode-se verificar a redução do fluxo decorrente da influência de ambas, infiltração e evaporação da água superficial. Ressalta-se também que a taxa de infiltração de água depende da velocidade do fluxo da mesma. Quanto maior a velocidade, menor será a infiltração e maior será a taxa de erosão do solo.

Tratando-se de erodibilidade física, a vegetação local exerce grande influência. Primeiramente, nas regiões de depressão e acúmulo de água tem-se a geração de solos

salinos desenvolvidos a partir da evaporação das águas ali alocadas. Este tipo de ambiente é considerado hostil para o crescimento de vida vegetal bem desenvolvida, seja pela composição do solo, seja pela dificuldade de fixação de sementes no solo. Tal característica não auxilia nenhuma das formas de intemperismo.

Dentre as duas formas de intemperismo, o químico e o físico, uma é predominante no sistema no qual a costa da Namíbia está inserido. O químico prevalece em ambientes quentes, porém principalmente úmidos, onde existem fluídos suficientes para realizar as trocas químicas entre as fases minerais e então gerar os minerais de alteração. Já o intemperismo físico é acentuado em regiões onde agentes como o vento e deslizamentos em encostas são frequentes, possibilitando a desagregação das rochas. Devido ao clima semiárido, o intemperismo físico predomina na região da Namíbia, onde ventos e *flash floods* são as principais formas de transporte sedimentar. O intemperismo químico também é presente, porém em menor escala, visto que não há umidade nem permanência de fluídos sobre as rochas por tempo suficiente.

#### 2.4 DEPÓSITOS MINERAIS DA NAMÍBIA

De acordo com dados adquiridos pelo Serviço Geológico da Namíbia, e publicados no *Mining Journal* (1997), existem onze principais formas de mineralizações que são economicamente viáveis no território da Namíbia, tais como diamantes em sistemas fluviais, estranho em pórfiros, urânio em pláceres entre outros. Dentre esta grande diversidade de elementos que são extraídos na mineração, alguns se destacam por sua grande abundância e importância econômica. São eles cobre, zinco, estanho, chumbo, e urânio. Também são muito comuns diamantes, principalmente na região costeira.

Através da interpolação de dados do Projeto Acacia tem-se o mapa de ocorrências minerais de seis principais minérios (Figura 6). É possível assim identificar a abrangência de ocorrência de alguns minerais e as bacias de captação que escoam o sedimento associado, assim provendo informações quanto ao possível deslocamento sedimentar.

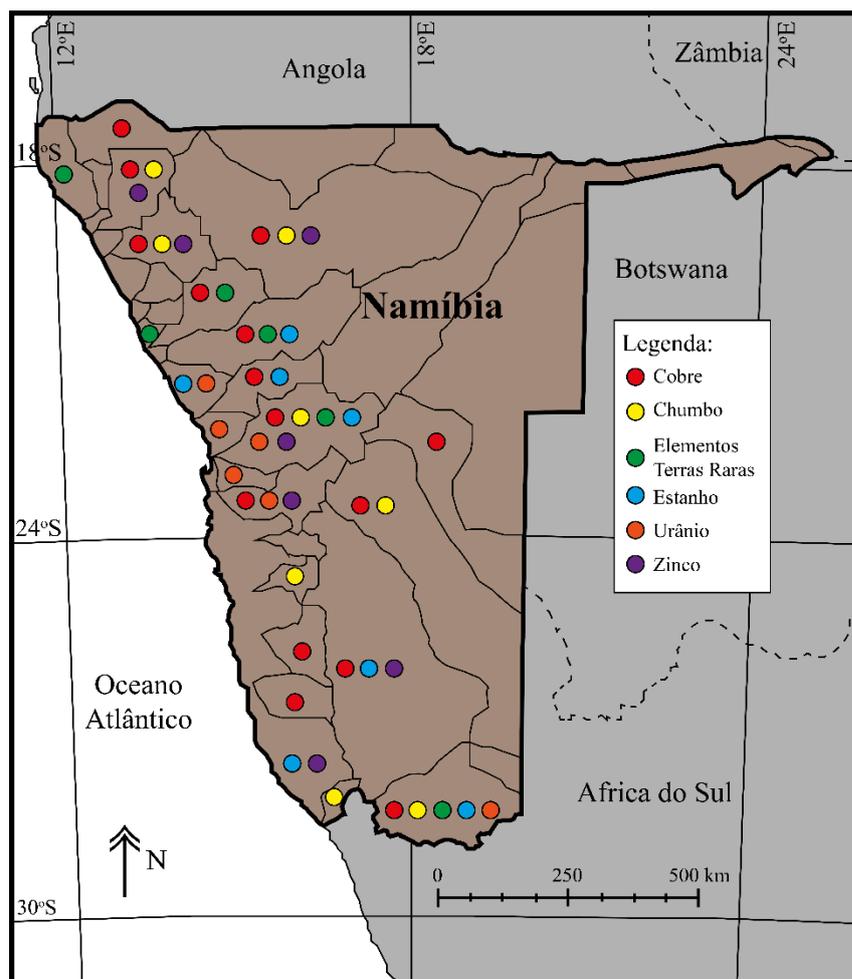


Figura 6 -- Mapa da distribuição dos depósitos minerais inseridos nas bacias de captação da Namíbia (do autor).

Neste item são abordados temas relativos aos principais depósitos minerais encontrados na Namíbia. Para cada depósito tem-se informações quanto a localização, extensão, rocha hospedeira e forma de ocorrência do minério. Desta forma, presta-se especial atenção nos quesitos que descrevem a forma com que a mineralogia do minério ocorre, de forma a prover informações que auxiliam na identificação em lupa destes materiais, caso sejam presentes.

### *Diamante*

As principais localidades dos depósitos aluviais de diamantes da Namíbia localizam-se ao longo do Rio Orange e também na sua foz, no Oceano Atlântico, segundo mapa publicado pelo Projeto Acacia da Universidade de Cologne. Os principais depósitos estendem-se até a cidade de Lüderitz, sendo a abundância e tamanho dos diamantes gradativamente menores conforme desloca-se para o Norte ao

longo da linha costeira (Hallam, 1964). Tal ocorrência se dá pela presença da Corrente de Benguela que transporta os sedimentos costeiros no sentido Sul-Norte, e pelas ondas, ventos e outros fatores.

O estudo de proveniência dos diamantes localizados entre a foz do rio Orange e Elizabeth Bay realizado por Phillips, & Harris (2009) foi realizado em cristais de coloração amarronzada a amarelada com hábito de “dodecaedro arredondado” e que continham inclusões de clinopiroxênios. Aqueles piroxênios associados à paragênese peridotítica apresentavam coloração verde esmeralda com altos níveis de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , enquanto que os associados a eclogitos apresentavam coloração verde pálido com altos teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{FeO}$ . Quanto a suas origens, 80% dos diamantes foram identificados como vindos dos kimberlitos sul-africanos do Grupo I, sendo o restante do Grupo II. Quanto a drenagem, evidenciou-se que o transporte entre a zona central sul-africana onde se localizam os kimberlitos e a costa namibiense foi através do paleodrenagem do Rio Karoo e drenagem atual do Rio Orange. Depósitos aluviais diamantíferos também ocorrem, em menor quantidade, até a região da cidade de Hoanib, ao norte da costa namibiense (Hallam, 1964).

## ***Cobre***

### Mina Tsumeb Smelter

Este depósito localiza-se nas proximidades da cidade de Tsumeb e tem grande variedade de corpos mineralizados, sendo os principais de chumbo, cobre, zinco, prata, cádmio e germânio (USGS). Sua estrutura é do tipo *pipe* que se estende por 1,5 km de profundidade e está inserido nas rochas dolomíticas do Supergrupo Tsumeb. A mineralização está associada à processos de brechação e interação com fluidos mineralizantes (Haynes, 1984).

A mineralogia associada ao depósito é de grande variedade e complexidade, como postulado por (Pinch *et al.*, 1977), visto que existem zonas de sulfetos de oxidação e hipogênicos. Os tipos minerais utilizados para beneficiamento são, segundo a USGS, anglesita, bornita, cerussita, calcocita, calcopirita, covelita, digenita, enargita, galena, greenockita, molibdenita, pirita, smithsonita, esfalerita, stromeyerita, tenantita e wurtzita (USGS).

### Mina Otjihase

Este depósito localiza-se a cerca de 20 km NE da capital Windhoek e apresenta grande variabilidade elementar. O depósito é do tipo estratiforme massivo e ocorre com formato lenticular. A mineralização é hospedada em um quartzo-mica-granada xisto proveniente da Formação Kuiseb (Kennedy, 1978). Este xisto está por sua vez associado ao *Matchless Amphibolite Belt* (MAB) que se inicia ao Sul de Walvis Bay e termina a 110 km de Windhoek, contabilizando assim cerca de 330 km de extensão por 10 km de largura em linha reta. Ao longo deste cinturão existem diversas mineralizações de cobre além de Otihase, como Hope, Gorob, Matchless, Ongeama, Ongombo, Onhanja entre outros (*Scientific Communications*, 1978).

A mineralogia do depósito de Otjihase, e dos demais depósitos de cobre mencionados anteriormente, é composta principalmente por sulfetos como pirita, calcopirita, esfalerita, pirrotita e galena. Tem-se como característica destas mineralizações quantidades variáveis de elementos como zinco, chumbo, prata (na calcopirita) e ouro (livre nos sulfetos). O cobre também costuma estar associado a lentes de magnetita-quartzito. O principal mineral beneficiado é pirita, que constitui cerca de 90% do corpo e apresenta-se euédrica (*Scientific Communications*, 1978).

### ***Estanho***

#### Mina Uis

Esta mina localiza-se a cerca de 200 km E da cidade de Omaruru, ao longo do *Cape Cross-Uis Belt*, um cinturão de 120 km por 24 km que se estende ao noroeste da cidade de Cape Cross e apresenta uma série de pegmatitos com composições mineralógicas e gemológicas diferenciadas. Estes corpos são separados em dois grupos, os quartzo-feldspáticos sem mineralizações de metais raros, e os que apresentam mineralizações de estanho, lítio, nióbio, tântalo, berílio ou turmalinas (verde oliva, azul e vermelho rosado) e berilo (verde amarelado) gemológicas.

Os pegmatitos enriquecidos em estanho ocorrem na forma de cerca de 120 enxames direcionados ao nordeste e leste, podendo cada um deles chegar a extensões de 1 km por 50 m. Quanto ao mineral de estanho, tem-se cassiterita, que apresenta zonação bem evidenciada pela coloração, que varia de acordo com os teores de nióbio, tântalo e estanho. Comumente apresenta inclusões pretas opacas disseminadas em seu interior,

compostas por soluções sólidas de nióbio, tântalo e estanho, como tapiolita, ixiolita, Ta-columbita e wodginita. Minerais de lítio também são identificados, como petalita e ambligonita. (Diehl, 1993).

### **Urânio**

Como determinado por Conde *et al.* (2012), a Namíbia possui a segunda maior reserva de urânio da África (284200 t) e maior produção do continente (4498 t/ano). Tais valores sugerem que exista grande quantidade de depósitos e grande variedade de tipos também. As principais formas de mineralização, segundo Roesener & Schreuder (2005) são: (a) ocorrências associadas à rochas plutônicas; (b) ocorrências pedogênicas e; (c) ocorrências sedimentares. Os depósitos considerados sedimentares e pedogênicos apresentam grande similaridade, visto que os sedimentares epigenéticos também são gerados a partir do intemperismo de rochas. Segundo postulado pelo mesmo autor, o critério utilizado para categorizar um depósito como um destes tipos é a partir da forma e da distância do transporte (distância entre rocha-fonte uranífera e mineralização).

Segundo o boletim “*World Distribution of Uranium Deposits*” (UDEPO), publicado originalmente em 1996 pela IAEA e com última revisão em 2013, a Namíbia possui 42 depósitos de urânio em seu território. Os dados publicados servem como base para as descrições dos depósitos deste trabalho. Incrementa-se com um quadro descrevendo a mineralogia uranífera que compõe os depósitos da Namíbia, incluindo características distintivas e forma de ocorrência, modificado de Kinnaird *et al.* (2016), no Quadro 3.

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula química ideal</b>	<b>Forma de ocorrência</b>	<b>Características distintivas</b>
Betafita	$(Ca, Na, U, REE)_{16-x}(Nb, Ti)_{16}O_{48}$ $(O, OH, F)_{8-y} \cdot zH_2O$	Primário em pegmatitos graníticos	Cor marrom, translúcido a opaco
Betauranofano	$Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$	Secundário em minérios oxidados, veios graníticos e pegmatitos	
Branerita	$(U^{4+}, REE, Th, Ca)(Ti, Fe^{3+}, Nb)_2(O, OH)_6$	Primário em granitos, pegmatitos e como detrítico em pláceres de ouro	
Carnotita	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$	Secundário em arenitos e calcretas localizados em	Cor amarela, opaco

		paleocanais, próximos de matéria carbonática e playas. Produto da alteração de uraninita, montroseita e davidite.	
Davidita	$[(\text{Fe}^{2+}, \text{REE}, \text{U}, \text{Ca}, \text{Zr}, \text{Th})_6 (\text{Ti}, \text{Fe}^{3+}, \text{V}, \text{Cr})_{15} (\text{O}, \text{OH})_{36}]$	Primário em leucogranitos e pegmatitos	
Uraninita	$\text{UO}_2$	Primário em pegmatitos graníticos e sieníticos, em crostas coliformes de alta temperatura em veios hidrotermais.	Cor preta, opaco
Uranofano	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Secundário em pegmatitos	Cor amarela, translúcido
Uranothallita (Liebigite)	$\text{Ca}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Secundário gerado pela alteração da uraninita em soluções álcali-carbonáticas.	Cor amarela, de transparente a translúcido

Quadro 3 - Características dos minerais de urânio e suas ocorrências (modificado e traduzido de Roesener & Schreuder (2005)).

*Ocorrências associadas a rochas plutônicas:* Rochas geralmente félsicas, como granitos do tipo Salem (sin e pós-tectônicos); leucogranitos (sin e pós-tectônicos); e alaskitos. De acordo com Roesener & Schreuder (2005), as mineralizações de urânio ocorrem disseminadas nas rochas félsicas e costumam gerar depósitos de grande extensão porém de baixa tonelagem. A maioria dos depósitos deste tipo está associada à fase final da Orogenia de Damara, com magmatismo entre 190-120 Ma, e a disposição dos diversos corpos mineralizados segue um sentido de NE-SW ao longo de lineamentos e falhamentos, por uma área de 70 km por 30 km (Kinnaird *et al.*, 2016).

#### Mina Rössing

Conhecida como uma das maiores minas de urânio do mundo, a mina de Rössing é localizada a 70 km a NE da cidade de Swakopmund. De acordo com Roesner & Schreuder (2005) a mineralização ocorre em granitos e pegmatitos alaskíticos associados a rochas encaixantes metassedimentares das Formações Khan e Rössing. O principal mineral explorado é a uraninita, que se apresenta na forma de inclusões de cerca de 0,3 mm em grãos de quartzo, feldspatos e biotita. Secundariamente tem-se a betafita, que pode apresentar-se em tons de marrom ou amarelo na forma de inclusões

em quartzo e feldspato, podendo conter quantidades significativas de nióbio e titânio. Quanto ao mineral secundário que contém urânio, o mais abundante é betauranofano. Esta mina situa-se em uma das quatro zonas com anomalias de urânio na região (Kinnaird *et al.*, 2016)

#### Depósito Husab

O depósito localiza-se a 45 km da cidade de Walvis Bay, em meio ao *Namib Desert* e possui cerca de 8 km de extensão e também é denominado como Rössing Sul, devido a sua proximidade e similaridade de ocorrência. Segundo Kinnaird *et al.* (2016) o depósito é constituído de granitos alaskíticos acamadados (controle intrusivo estrutural), gerados no final da Orogenia de Damara. As rochas encaixantes são das Formações Rössing e Khan que foram dobradas durante a orogenia e agora fazem parte dos Complexos da Sinclinal de Kuiseb e Anticlinal Rössing Sul. A forma de ocorrência do urânio é principalmente no mineral uraninita, que apresenta-se bem disseminado na rocha e com cristais que podem chegar a 120  $\mu\text{m}$  (Spivey *et al.*, 2010). Também são minerados brannerita, coffinita e betafita.

#### Depósitos Garnet Valley, Holland's Dome, New Camp, Ida Central, Ida East, Swakop East e Hook

Estes depósitos localizam-se ao redor do Domo de Ida e alojam-se entre as Formações Khan e Husab, na forma de granitos alaskíticos. Têm como característica a presença de xenólitos de mármore e xistos da Formação Khan que tem de 1m a 1 km de extensão e por vezes apresentam-se mineralizados (Roesener & Schreuder, 2005). Os minerais de urânio são uraninita, uranofano e brannerita, sendo a presença dos minerais secundários gradualmente menos abundantes conforme se alcançam níveis mais profundos da mineralização (Kinnaird *et al.*, 2016).

#### Depósito Goanikontes

Localizado a 31 km E de Swakopmund, este depósito de leucogranitos pós-tectônicos aloja-se no contato entre os mármore e xistos da Formação Rössing com a Formação Khan. Como característica distintiva estes granitos possuem quartzo de coloração quase preta e topázio. Os minerais de urânio são uraninita com traços de brannerita e betafita. Uranofano e coffinita também são identificados nas porções superficiais do depósito (Kinnaird *et al.*, 2016).

### Depósito Valencia e Namibplaas

Ocorrem à 25 km a NE da mina de Rössing na forma de camadas de leucogranitos que intrudem as rochas da Formação Khan e por vezes a formação Karibib. No caso de Valencia, a mineralização primária de uraninita ocorre disseminada nos alaskitos de granulometria fina e os secundários uranotalita e uranofano ocorrem como “capas” amareladas sobre grãos (UDEPO, 2013). Localizado a 7 km NE de Valencia, a mesma forma de mineralização ocorre em Namibplaas (Kinnaird *et al.*, 2016).

*Ocorrências pedogênicas:* Depósitos gerados a partir da decomposição por intemperismo dos depósitos associados a rochas plutônicas. Ocorre em zonas de enriquecimento supergênico, que ao longo do processo concentra urânio e assim gera minerais secundários enriquecidos no elemento, sem transporte do material.

### Depósito Mile 72

A localização deste depósito é a cerca de 100 km N da cidade de Swakopmund e situa-se sobre sedimentos eólicos, fluviais e solos cimentados por gipso, halita e calcita. Tais sedimentos localizam-se sobre rochas do embasamento, como granitos, pegmatitos, alaskitos, entre outros (Roesener & Schreuder, 2005). Grande parte destas rochas é enriquecida em urânio, e a partir da sua decomposição pelo intemperismo e ação de águas subterrâneas gerou-se o depósito. Os minerais uraníferos são a carnotita, como produto supergênico, e a uraninita, proveniente dos granitos (UDEPO 2013).

*Ocorrências sedimentares:* Podem ser de origem singenética ou epigenética. Sendo a primeira com geração do depósito juntamente da rocha hospedeira e a segunda muito tempo após a formação. Segundo Kinnaird *et al.* (2016), os depósitos sedimentares/superficiais de urânio da Namíbia datam no máximo 60 Ma e ocorrem como preenchimento de paleocanais fluviais localizados no Deserto Namib.

### Mina Langer Heinrich

Este depósito é localizado a 90 km a E da cidade de Swakopmund e é considerado do tipo sedimentar epigenético devido a geração de minerais secundários de urânio no paleocanal do Rio Gawib. A partir do intemperismo de granitos uraníferos, xistos vanadíferos e da interação de tais íons com as águas subterrâneas e com os

calcretes gerados nos paleocanais, o depósito de cerca de 14 km de extensão por 1-30m de largura foi gerado, porém com distribuição irregular das zonas mineralizadas (Kinnaird *et al.*, 2016). Esta zona apresenta-se envolta por uma zona de mineralização de baixo grau (UDEPO 2013). A única espécie minerada é a carnotita, que apresenta-se em tons amarelados e disseminada nas rochas, como cobertura de seixos, como substituto parcial da matriz das rochas calcárias que o hospedam (Hartleb, 1987) ou na forma de filmes finos cobrindo cavidades (UDEPO 2013).

Segundo *Bowell et al.* (1987), este tipo de depósito pode estar associado a diversas outras espécies minerais que contem urânio, tais como andersonita, liebigita, rutherfordina, swartzita, tyuyamunita e urancalcárito.

#### Mina Klein Trekkopje

O depósito é localizado a 80 km E da cidade de Swakopmund e ocorre em dois paleocanais, com cerca de 16 km de extensão por alguns de largura. As rochas que embasam o depósito são leucogranitos com turmalina e biotita-xistos enriquecidos em vanádio. O mineral minerado é a carnotita, que possui coloração amarela, que só tem sua formação propiciada devido aos altos teores de vanádio das rochas que a embasam e às altas taxas de evaporação. Ocorre comumente disseminada nos conglomerados ou intersticial no cimento carbonático (Youlton, 2007).

#### **Zinco**

#### Mina Rosh Pinah

O depósito é localizado a 23 km N do Rio Orange e a 100 km E do Oceano Atlântico, nas proximidades das cidades de Rosh Pinah e Tutungeni. Sua gênese se deu a partir de um rifteamento que ocorreu a 740 Ma que permitiu a deposição de rochas vulcanoclásticas, predominantemente siliciclásticas e subordinadamente de rochas calcárias, seguidas de vulcanismo félsico. De acordo com a zonação mineral dos corpos foi possível inferir que houve extensa atividade hidrotermal agindo na área, assim gerando os depósitos (Alchin *et al.*, 2005). Tem-se depósitos disseminados ou em veios em rochas carbonáticas, e em bandas de sulfeto maciço e em camadas de folhelhos silicificados e arenitos ricos em feldspatos, todos componentes da Formação Rosh Pinah (Alchin *et al.*, 2005).

Dentre a mineralogia do depósito, tem-se grande variabilidade de sulfetos, sendo eles esfalerita, galena, calcopirita e pirita. Os três primeiros são os minerados para retirada de zinco, chumbo e cobre, respectivamente (Nejeschlebová *et al.*, 2015). Alguns minerais apresentam características distintivas, como a esfalerita, que de acordo com seus teores de manganês e ferro pode ter cores que variam entre laranja, cinza, amarelo e marrom. Intercaladas às mineralizações tem-se camadas e lentes de minerais enriquecidos em bário como barita, bensronita, witherita, baritocalcita, norsethita e celsian, assim como dolomita, bornita e ouro nativo.

### Mina Skorpion Zinc

Localizado a 40 km N do Rio Orange e a 15 km NW da mina de Rosh Pinah, o depósito de zinco Skorpion é caracterizado como supergênico, de ocorrência única no mundo. As rochas que contém o corpo de minério são sedimentares e vulcanoclásticas geradas durante o rifteamento entre a Província Cratônica do Kalahari e Rio de La Plata. Posteriormente essas rochas foram metamorfasadas, assim gerando metarenitos arcóseos e metavulcanoclásticas. Toda associação de rochas está localizada abaixo de uma grossa camada de calcrete e de dunas do *Namib Desert* (Borg *et al.*, 2003).

Os minerais utilizados para o beneficiamento de zinco são, diferentemente dos demais depósitos de zinco do mundo, silicatos e carbonatos. São eles sauconita, hemimorfita, smithsonita, scholzita, tarbutita, atacamita, hidrozincita e hetearolito. Tais minerais foram originados em processos pós-metamórficos, a partir da percolação de águas meteóricas que propiciaram a oxidação e remobilização de metais dos sulfetos de zinco (Borg *et al.*, 2003).

### ***Fluorita***

### Mina Okorusu

Este depósito localiza-se a 40 km N da cidade de Otjiwarango e sua gênese foi a partir da percolação de fluidos que podem ter sido meteóricos ou de origem ígnea, que interagiram com rochas carbonatíticas (*Cretaceous Okorusu carbonatite*). A mineralização ocorre nas porções externas da zona de fenitização no contato com rochas sedimentares carbonáticas e cálcio-silicáticas da Sequência de Damara (Bühn *et al.*, 2002).

A fluorita pode ocorrer como produto de alteração em rochas que contenham calcita, limonita e feldspato, ou como veios maciços que interceptam bandas de mármore quartzoso. Costuma apresentar-se euédrica com até 2 cm de diâmetro, com cores que variam de amarelo escuro até transparente, sem inclusões. Também estão presentes, em menor escala halita, silvita, nacolita, óxidos/hidróxidos de bário e cálcio, galena, cerussita, fluorapatita, criolita, burbankita, pirita, fluorita, barita, entre outros. (Bühn *et al.*, 2002).

## 2.5 ÁREA DE ESTUDO - REGIÃO COSTEIRA

### *Características composicionais da plataforma continental*

A região costeira da Namíbia é delimitada pelos rios Orange e Kunene (Figura 4) e apresenta níveis de humidade mais altos do que aqueles medidos na região interiorana do país. Devido a influência direta da Corrente de Benguela, a zona costeira pode ser subdividida em duas zonas principais a partir da cidade de Walvis Bay. A norte tem-se grande densidade de rios efêmeros e bacias de captação de maior porte, o que influencia diretamente na descarga sedimentar. E a sul se tem zonas onde ocorre um “surgimento” das águas frias, chamado de *surface upwelling*, que faz com que a água torne-se mais rica em nutrientes, influenciando assim nas características de vida aquática. Outra subdivisão pode ser feita na porção sul da costa, baseada na presença de diamantes em meio aos sedimentos. Neste caso ao Sul da cidade de Lüderitz tem-se a chamada Costa do Diamante, amplamente conhecida e minerada pela presença de diamantes que são transportados pelo Rio Orange ao Sul (Goudie & Viles, 2015).

O Rio Orange, por seu tamanho e importância na dinâmica sedimentar da região da costa oeste da porção sul-africana, foi alvo de estudos de Rogers & Rau (2010). Neste trabalho o delta do Rio Orange e suas adjacências foram caracterizadas quanto a mineralogia e alguns padrões foram definidos. Ao Sul do delta tem-se sedimentos de menor granulometria e maior quantidade de componentes biológicos, enquanto que ao Norte tem-se sedimentos de maior granulometria e menor quantidade de carapaças de microrganismos. Tal ocorrência se dá pela ação de deriva litorânea, que transporta os sedimentos mais grossos para norte (influenciado pela Corrente de Benguela) e correntes polares profundas, que transportam material síltico e argiloso para sul. Desta

forma, juntamente com trabalho de Rogers & Bremner (1991), tem-se o conhecimento de que a maior parte dos sedimentos terrígenos encontrados na região costeira do sul da África são provenientes do Rio Orange, com pequenas contribuições de outros rios. E segundo De Decker (1986), o tamanho de grão destes sedimentos não será grosso devido ao fato de que o Rio Orange introduz principalmente materiais de granulometria inferior a areia muito fina, sendo os sílticos e argilosos transportados para sul como mencionado anteriormente.

A região costeira da Namíbia até a latitude da cidade de Silvia Hill foi alvo de estudo de Bremner (1981), que obteve informações quanto à batimetria da zona, contribuindo assim para a delimitação de duas grandes unidades morfológicas, a *Kunene Shelf*, localizada ao Norte da latitude 18°40' (aproximadamente Cape Fria), e *Walvis Shelf*, localizado ao Sul. Dentre as diversas características desta área a primeira apresenta depressões rasas com o formato de vales submarinos, decorrentes da erosão causada por antigos canais fluviais em épocas onde o nível do mar encontrava-se em níveis mais baixos. Quanto a *Walvis Shelf*, tem como principal característica uma espessa camada de lama rica em diatomáceas.

Ainda sobre o estudo de Bremner (1981), um estudo composicional foi realizado através de metodologia de análise em lupa. Foram subdivididas três principais classes. Tem-se sedimentos autigênicos, que podem ter predominância de glauconita ou de fosforito; biogênicos, com predominância de diatomáceas ou foraminíferos e moluscos e; sedimentos de origem terrígena, com abundância de quartzo. As relações composicionais, assim como as granulométricas, podem ser verificadas na Figura 7. Assim como a subdivisão morfológica, é possível identificar mesma subdivisão composicional na latitude 18°40', onde ao Norte tem-se predomínio de sedimentos terrígenos e ao Sul de biogênicos, com abundância de foraminíferos e moluscos no talude superior e diatomáceas no talude inferior. O mesmo ocorre com os minerais autigênicos, sendo a glauconita abundante na *Kunene Shelf* e a o fosforito abundante em *Walvis Shelf*.

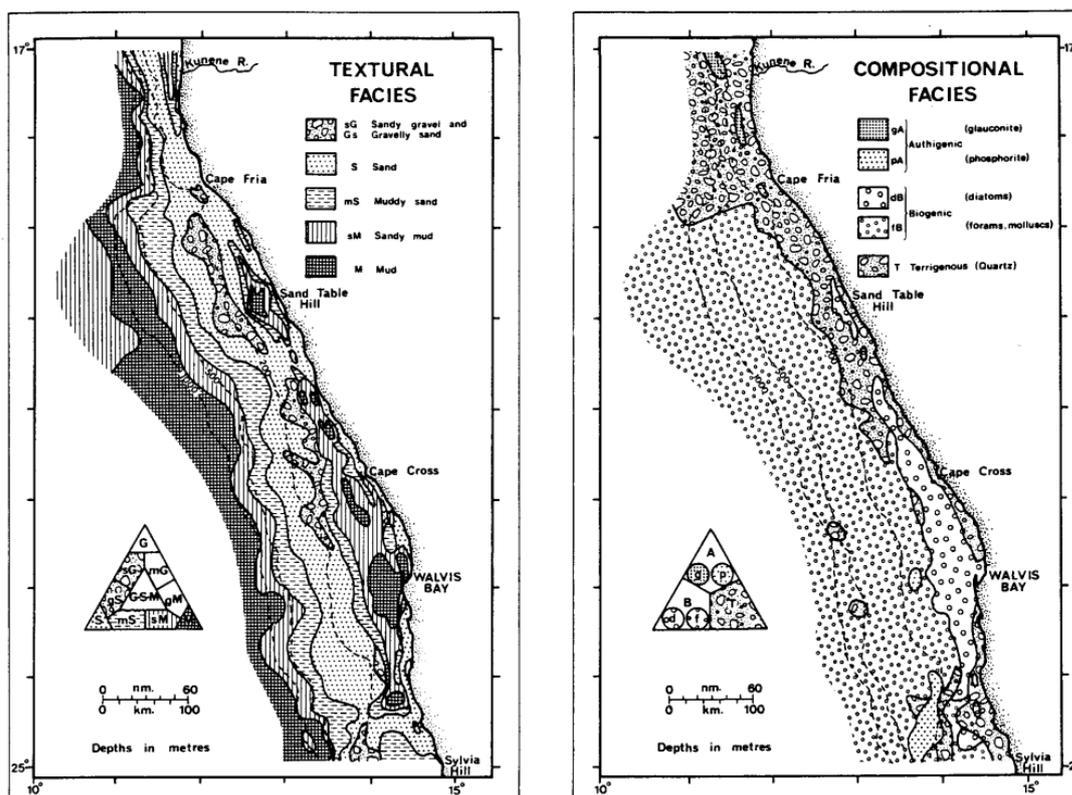


Figura 7- Mapa textural (A) e composicional (B) da porção norte da costa da Namíbia (extraído e traduzido de Bremner, 1981).

O mesmo trabalho de Rogers & Rau (2010) demonstra que toda margem continental apresenta domínio de sedimentação biogênica, causada pela alta produtividade biológica relacionada ao sistema de ressurgência da região. Dentre os principais constituintes biogênicos se tem foraminíferos como *Neogloboquadrina pachyderma*, *Globigerina quinqueloba*, *Globorotalia inflata*, *Globorotalia truncatulinoides* e *Globigerina bulloides*. A Figura 8c, retirada de Giraudeau & Rogers (1994) mostra a distribuição de tais foraminíferos ao longo da costa da África do Sul e Namíbia. Quanto à presença de matéria orgânica e carbonato de cálcio dissolvido nas águas da costa africana tem-se o mapa retirado de Rogers & Bremner (1991), demonstrado na Figuras 8a e 8b respectivamente.

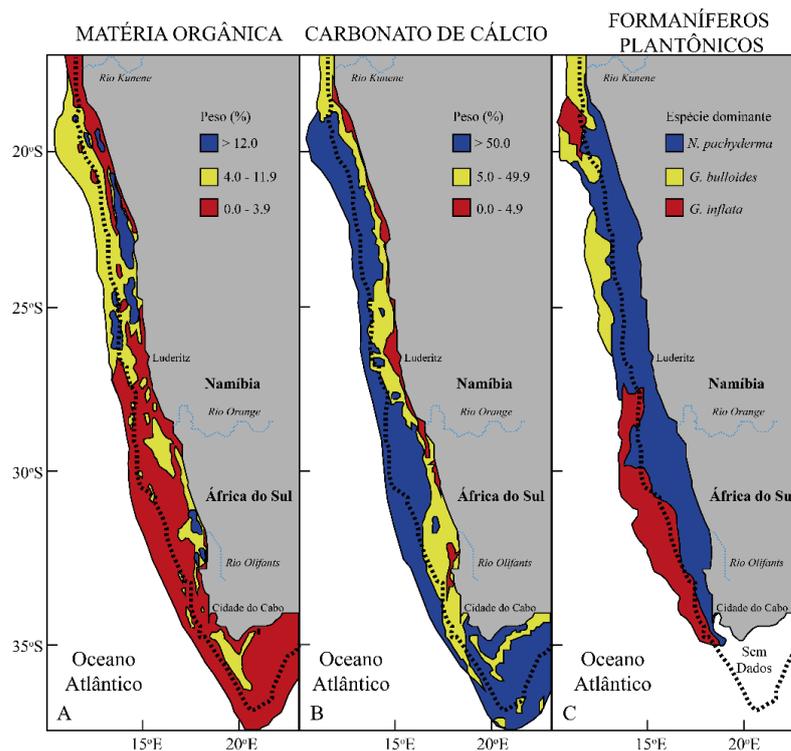


Figura 8 - Mapa de distribuição de matéria orgânica (A), carbonato de cálcio (B) e foraminíferos plantônicos (C) da costa oeste da África do Sul e Namíbia (extraído e modificado de Rogers & Bremner (1991).

Já em relação à mineralogia acessória da região adjacente a norte do delta do rio Orange, tem-se epidoto, ilmenita e granada localmente abundante, principalmente na região próxima de Lüderitz (Rogers & Bremner, 1991).

### *Características da porção emersa da costa*

Estudo realizado por Heine *et al.* (2010) mapeia a composição dos solos de diversas regiões da Namíbia. Foram definidas sete províncias de argilominerais a partir de análises por difratometria de raios X. A variabilidade composicional de interesse neste artigo é marcada pela presença e/ou ausência de clorita, ilita, interestratificados, esmectita, caulinita, paligorsquita e sepiolita. Também foram identificadas proporções variantes de quartzo, feldspatos, óxidos de ferro, calcita e dolomita. Dentre todas as províncias, cinco relacionam-se com a região de costa, seja pela proximidade com a região costeira ou pela relação com grandes rios perenes que chegam ao oceano. A Figura 9A demonstra a relação espacial entre as províncias e suas composições majoritárias de argilominerais. A Figura 9B apresenta fluxos de descarga sedimentar de argilominerais no oceano, levando em conta a proporcionalidade de material transportado e sua espécie.

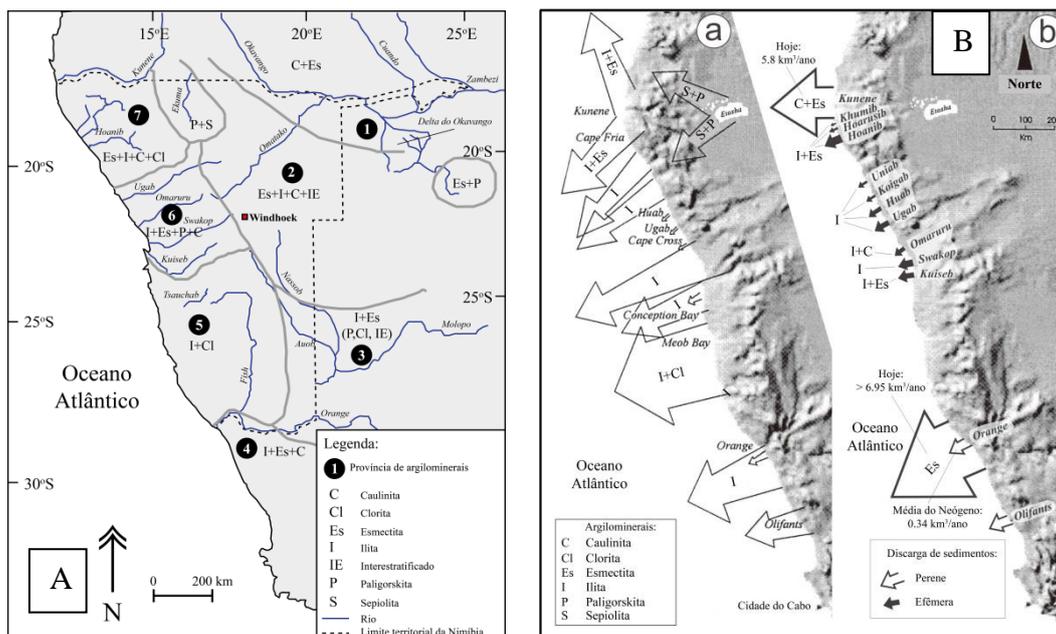


Figura 9 – (A) Mapa de províncias de argilominerais (extraído e traduzido de Heine *et al.*, 2010). (B) Distribuições dos argilominerais ao longo da costa inferidas por Heine, (extraído e modificado de Heine *et al.*, 2010).

Conforme evidenciado no mapa produzido por Heine *et al.* (2010), a província 4 abrange as proximidades do Rio Orange, com amostras coletadas em ambos lados do curso d'água. A província 5 apresenta maior abrangência e densidade de amostras e abrange todo *Namib Erg* e região entre os rios Orange e Kuiseb. A província 6, localizada entre os Vales de Ugab e Kuiseb e a província 7 abrange a porção ao norte do Vale Ugab, e compreende o *Namib Desert*.

O Quadro 4, modificado de Heine *et al.* (2010) apresenta as quantidades médias relativas de argilominerais em cada província. Pode-se perceber que ilita ocorre comumente como argilomineral de maior abundância. Caulinita e esmectita também estão presentes em todas as províncias e em quantidades significativas. Quanto a paligorskita e sepiolita, são abundantes na província 6, assim evidenciando as condições de aridez mais extrema da região. Estudos da mineralogia dos solos adjacentes a alguns rios também foram descritos por Heine *et al.* (2010), como segue na Quadro 5.

	<b>Ilita</b>	<b>Caulinita</b>	<b>Esmectita</b>	<b>Paligorsquita</b>	<b>Clorita</b>	<b>Interstratificado</b>	<b>Sepiolita</b>
<b>Província 4</b>	40%	20%	40%	-	-	-	-
<b>Província 5</b>	40-70%	5%	25%	10%	25%	-	-
<b>Província 6</b>	20-50%	10-15%	15-30%	30%	-	15%	30%
<b>Província 7</b>	30-35%	10%	30-60%	35%	10%	5%	-

Quadro 4 - Quantidades relativas de argilominerais distribuídas nas quatro províncias consideradas neste trabalho (extraído, modificado e traduzido de Heine *et al.*, 2010).

	<b>Ilita</b>	<b>Caulinita</b>	<b>Esmectita</b>	<b>Paligorsquita</b>
<b>Rio Omaruru</b>	50%	10%	20%	10%
<b>Rio Swakop</b>	60%	20%	20%	-
<b>Rio Kuiseb</b>	40%	12%	40%	-

Quadro 5 - Quantidades relativas de argilominerais em solos adjacentes aos rios Omaruru, Swakop e Kuiseb (extraído e traduzido de Heine *et al.*; 2010).

### 3 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

A metodologia deste trabalho é composta por diversas formas de caracterização mineralógica, seja através de análise de propriedades físicas por ortoscopia, por imageamento por MEV, análise química por EDS ou microsonda.

#### 3.1 AMOSTRAGEM

##### Princípios teóricos

A coleta das amostras foi realizada pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA) ao longo da costa da Namíbia, localizada na porção sudoeste do continente africano. Tendo em vista a abrangência científica do projeto realizado pela agência, a escolha dos pontos de amostragem levou em conta uma série de aspectos naturais e antropogênicos, tais como:

- Proximidade de centros urbanos: influência direta na composição das águas marinhas devido a possíveis casos de contaminação por resíduos urbanos.
- Proximidade da foz dos rios, independente de seu porte: influência no aporte de sedimento proveniente de zonas interioranas do país, de acordo com as bacias de captação de cada um.
- Distância em relação à costa: influência quanto a variação granulométrica e composicional dos sedimentos em diferentes proximidades da linha de costa.
- Ocorrência de grandes formas de relevo nas adjacências: presença de grandes desertos que impedem o transporte dos sedimentos de suas adjacências

Desta forma foram definidas duas principais zonas de amostragem, a primeira localizada ao Norte de Walvis Bay, cidade portuária de grande importância. Esta região apresenta grande densidade de rios efêmeros e grande variabilidade geológica nas porções que adentram o continente, com algumas regiões desérticas de grande porte. É nesta região que se localizam as principais minas de urânio e chumbo, por exemplo. A segunda região é localizada nas proximidades de Lüderitz, cidade também portuária de grande importância, porém localizada a sul. Esta área foi amostrada devido à importância da cidade e à proximidade do Rio Orange, perene e de grande porte sedimentar. A área costeira entre estas porções não foi amostrada devido à presença do

grande deserto de Namib, um dos mais extensos o mundo. Desta forma tem-se duas zonas que denotam ambientes diferenciados, a norte, com grande quantidade de rios efêmeros, e a sul, com ausência de rios efêmeros porém com presença de rio perene.

#### Metodologia de coleta

Quanto à metodologia de coleta de material, 22 pontos foram amostrados, dentre os quais 16 fazem parte deste trabalho. Multicoletores de 60 mm de diâmetro foram utilizados para recolher testemunhos dos sedimentos marinhos. Após coleta, os sedimentos foram separados de acordo com sua posição no testemunho, de forma de que as amostras deste trabalho são referentes aos dois centímetros mais rasos. O quarteamento foi realizado após homogeneização e desta forma amostras com cerca de 1g foram disponibilizadas para análise.

#### Mapa amostral

A amostragem segue o padrão representado na Figura 10, onde é possível visualizar a localização de cada ponto testemunhado em relação à profundidade da plataforma marinha e as latitudes da região. Quanto à nomenclatura, manteve-se aquela fornecida pela IAEA, seguindo a seguinte lógica: amostras numeradas correspondem ao valor da latitude nos dois primeiros dígitos. Os demais três apresentam valor crescente conforme coletou-se material em porções mais profundas. Sendo assim, têm-se amostras nas latitudes 20'S (20010), 23'S (23002 e 23070) e 26' (26010 e 26050). As amostras com nomenclatura iniciada em Z (ZZ1, ZZ3, ZZ7, ZZ8 E ZZ9) correspondem à um padrão em zigue-zague quanto a profundidade de coleta, entre as latitudes 21'S e 23'S. Os demais nomes correspondem à siglas referentes a cidades, como Shearwater Bay (SWB), Walvis Bay *Harbour* (WBH), Walvis Bay Harbour Chanel (WBHC), Lüderitz Harbour (LUDH), Lüderitz Harbour Chanel (LUDHC) e Lagoon (LAG).

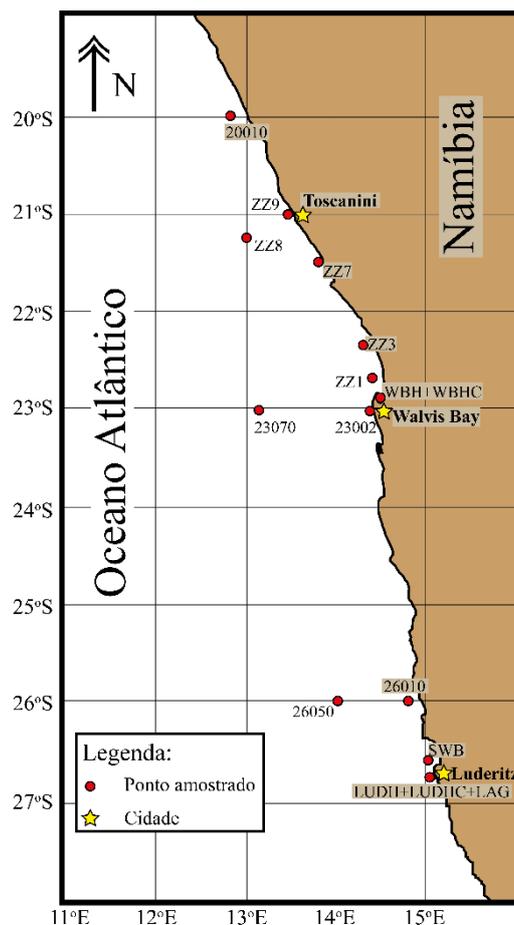


Figura 10 - Mapa de amostragem

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS - FRACIONAMENTO

#### *Método Decantação*

##### Princípios e instrumentação

Este método permitiu a separação da amostra em frações granulométricas e parte do princípio de que diferentes tamanhos de grãos irão decantar em tempos diferentes, pois seu peso é proporcional a sua área (considerando minerais de mesma densidade). Também se sabe que grãos mais densos irão afundar mais rapidamente que aqueles menos densos e com mesmo tamanho. Isso pode gerar um erro na separação, visto que os materiais mais densos, porém de menor tamanho irão decantar com aqueles menos densos e de maior tamanho. Para os fins deste trabalho, esse tipo de erro não é considerado preocupante, já que a separação do material é requerida somente para fins de facilitação das análises posteriores.

A partir do *software* SEDICALC® foi possível estimar o tempo de decantação para cada fração granulométrica desejada. Os parâmetros requeridos no software são tipo de fluido (água destilada), temperatura do fluido (25°C), altura no tubo de ensaio na qual se deseja extrair o material (20 cm) e tamanho das partículas que se deseja decantar (>10 µm ). No caso deste trabalho, a fração foi de 10 µm . Este valor foi definido a partir da quantidade de material disponível e análise visual de cada amostra. Ou seja, observou-se que as amostras eram compostas predominantemente por materiais arenosos, o que tornaria a probabilidade de grandes quantidades de material fino improvável. Por isso, apesar de desejar-se analisar a fração menor que 4 µm (fração argilosa), foi necessário delimitar um valor maior para que se pudesse obter material. Mesmo com o tamanho de partículas maior que o dobro do que se desejava, algumas amostras tiveram quantidades ínfimas destes materiais finos. Sendo assim, foi-se delimitado no *software* SEDICALC® que para separar-se fração menor que 10 µm em um cilindro d'água de 5 cm de diâmetro por 30 cm de comprimento eram requeridos 32 minutos de decantação. Assim, ao final desse período o material decantado seria de tamanho superior a 10 µm e o material em suspensão, menor que 10 µm . A Figura 11 ilustra o processo referido anteriormente.

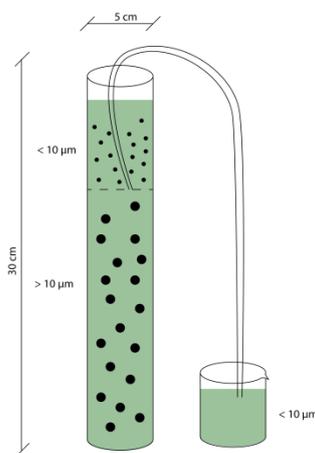


Figura 11 - Esquematização do processo de decantamento.

### Preparação

A preparação do material foi realizada no Laboratório Geoazur, vinculado à Universidade de Nice Sophia Antipolis - França. O processo foi iniciado com a hidratação com água ionizada para desalinizar a amostra, de forma que os grãos já secos e de estrutura colapsada pudessem retomar sua forma original, caso contrário a leitura dos espaçamentos das camadas dos minerais argilosos seria errônea. Após, se fez a

adição de cerca de 100 ml de água destilada em um vidro de Becker, juntamente com a amostra. Em seguida, colocou-se o vidro em um ultrassom, onde foi deixado por cerca de 15 minutos, o suficiente para homogeneizar a amostra, para que partículas que porventura estivessem aderidas se separassem e/ou dissolvessem-se.

Após este processo, despejou-se o líquido homogêneo em um cilindro alto (referido anteriormente) e completou-se com mais 200 ml de água destilada, sacudindo em seguida, de forma a tentar misturar o material em solução com a nova porção de água. Ao fim deste processo, adicionou-se uma mangueira que teve sua extremidade localizada na altura de 20 cm (requerido pelo *software*) e a outra em um vidro de Becker. A função desta mangueira foi retirar a porção da coluna d'água que fica acima da cota de 20 cm. Abaixo dos 20 cm estavam presentes as frações maiores. Portanto, retirou-se a porção do líquido com partículas finas (acima 20 cm) e colocou-se em um Becker. A porção com fração mais grossa (abaixo 20 cm) foi retirada do cilindro e colocada em outro Becker. Após, colocou-se o líquido com fração fina de volta ao cilindro e completa-se com água e mistura-se. Por mais 32 minutos a solução ficará decantando, e este processo será realizado mais uma vez (total de 3). A razão pela qual se repetiu este procedimento é que algumas partículas mais grossas poderiam ter sobrado entre as mais finas, então o que se fez foi um refinamento do material, para evitar ao máximo qualquer partícula de maior tamanho.

No final desta etapa, cada grupo granulométrico estava disposto em um vidro de Becker. Ambos frascos foram colocados em um forno a cerca de 50°C para que a água evaporasse e somente o sedimento sobrasse, caso contrário a coleta do material para análise em lupa, por exemplo, seria inviável. O frasco contendo a fração  $> 10 \mu\text{m}$ , por conter menor quantidade de líquido, demorou cerca de 24 horas para secar completamente. Já a fração  $< 10 \mu\text{m}$ , que continha muito mais líquido, demorou cerca de 3 dias. O resultado desta etapa de separação esta ilustrada na Figura 12.



Figura 12 - Material após fracionamento granulométrico. À esquerda fração inferior a 10  $\mu\text{M}$  , à direita superior.

### Aplicação neste estudo

Visto a necessidade de separação granulométrica para melhor qualificação das fases minerais, este método foi de grande utilidade, pois permitiu uma separação relativamente precisa e de fácil aquisição. Esta separação permitiu que a análise por DRX fosse facilitada, visto que a quantidade de fases minerais em cada fração foi reduzida.

### Limitações do método

O método pode ser muito preciso, porém deve ser repetido diversas vezes. Desta forma o material seria melhor selecionado e com probabilidades baixíssimas de serem encontrados materiais de granulometria excedente ao desejado. Em casos de materiais ricos em minerais pesados, o método por decantação seria totalmente eficaz se antes fosse realizada uma separação mineral por densidade.

### ***Método de Separação Magnética (Separador Isodinâmico Frantz)***

#### Princípios e instrumentação

O método de separação magnética permitiu o fracionamento de minerais com características magnéticas variadas, podendo ser diamagnéticos (fracamente repelidos), paramagnéticos (fracamente atraídos) e ferromagnéticos (fortemente atraídos). O equipamento é composto por dois grandes ímãs que possuem uma calha passando entre eles. Os ímãs tiveram sua corrente ajustada de acordo com o desejado e a partir disto formaram um campo magnético que atuou sobre a amostra, atraindo ou repelindo as

partículas. Uma segunda calha localiza-se entre os imãs com a finalidade de transportar a amostra no campo, para que este possa interagir com o material. Esta calha possui ângulo variável e componente vibratório também variável, que juntos são os agentes de transporte do material. Além dos fatores já mencionados, a quantidade de material disposto para separação também influencia no resultado final. Sendo assim, usualmente opta-se por quantidades menores para maior eficácia do método. No caso deste trabalho, a fração superior a 10  $\mu\text{m}$  da amostra foi disposta no separador. Devido a pequena quantidade de material, todo ele foi disposto no equipamento.

### Preparação

Para realização deste método a amostra foi disposta na extremidade indicada no separador, após a verificação a limpeza para evitar contaminações, e ajuste dos parâmetros de separação.

### Aplicação neste estudo

A utilização desta técnica neste trabalho foi necessária para facilitar a identificação mineral das amostras. Como descrito por Da Silva *et al.* (2013), a separação magnética auxilia muito as análises de difratometria de raios X, pois realiza uma concentração de minerais em duas fases diferentes, permitindo que minerais não tão abundantes tenham seus picos registrados. Sendo assim, a mineralogia acessória é melhor reconhecida quando se analisa o material separado. Na prática, quando o material é analisado em sua totalidade, uma quantidade excessiva de picos é gerada (quando existe grande variedade mineral), e como resultado ocorre a aglutinação e sobreposição de picos, o que interfere na interpretação da amostra, visto que a individualização de cada um é muito complexa.

Apesar de o equipamento Frantz ser comumente utilizado para separar minerais magnéticos, ele também apresenta capacidade de separação de minerais pesados. Estudos de Porat (2006) demonstraram eficácia do método ao separar fração quartzosa daquela que continha feldspatos e minerais pesados. Neste caso, a corrente aplicada foi alta, propiciando assim a geração de uma fração quase exclusivamente quartzosa.

### Condições analíticas e instrumentação

O equipamento utilizado foi um Separador Magnético Isodinâmico Frantz, pertencente ao Laboratório Geoazur, vinculado a Universidade de Nice Sophia Antipolis – França. Para realização deste método de fracionamento foi utilizado um campo magnético de 110V a 0.5 A, sendo o ângulo frontal 5° e o traseiro 4°. Com essas condições, cada amostra demorou cerca de 20 minutos para ser separada.



Figura 13 - Separador magnético isodinâmico Frantz.

### Limitação do método

Esta técnica possui limitações que são diretamente relacionadas aos parâmetros usados na separação, como os ângulos e voltagem. Porém, quando se tem a fração magnética muito fina e a não magnética mais grossa, pode ocorrer a aderência e prisão destes grãos. Por exemplo, estoque de grãos de micas nas reentrâncias de microfósseis. Neste caso a separação é extremamente difícil e quase impossível por esse método somente. Quando utilizado para finalidade de separação de pesados apresenta a limitação de separar juntamente com os pesados minerais como feldspatos.

### 3.3 ANÁLISE MINERALÓGICA MACROSCÓPICA EM ORTOSCOPIA

#### Princípios e instrumentação

O estudo de sedimentos através de uma lupa consiste na observação em grande aumento do material a ser observado. A partir de uma série de lentes bem dispostas e uma objetiva, é possível analisar grãos em aumentos variáveis, como de 80 vezes. Esta técnica é muito utilizada para a descrição macroscópica de minerais. Uma fonte de luz branca também é utilizada para iluminar o material, facilitando sua visualização. De forma a permitir o registro do que se é observado na lupa, uma câmera fotográfica é alojada segundo o eixo de observação das lentes.

#### Preparação

Para utilização deste método nenhuma forma de preparação de amostra foi requerida, visto que se dispôs a amostra na região indicada pelo equipamento. No caso dos sedimentos deste trabalho, utilizou-se de uma placa de Petri para dispor as amostras, devidamente limpo com acetona para evitar aderência de materiais externos.

#### Aplicação neste estudo

Este tipo de análise foi muito útil para este trabalho pois permitiu uma qualificação preliminar do material, sugerindo interpretações nas demais técnicas, como DRX e MEV-EDS. A partir da classificação dos grãos em grandes grupos de acordo com suas características foi possível inferir a composição da amostra e assim guiar as demais análises. Pode-se estimar proporções entre minerais micáceos, quartzosos, opacos, entre outros, assim contribuindo para a interpretação daquela amostra.

Devido a necessidade de utilização das técnicas de MEV-EDS, a identificação preliminar de propriedades dos grãos como coloração, inclusões, hábito e demais características diferenciadas propiciaram uma análise direcionada a identificação destes grãos nas demais técnicas. Além da análise de grãos minerais, este método auxiliou na identificação e separação de carapaças de microrganismos para devida classificação posterior em MEV.

### Condições analíticas e equipamento

O equipamento utilizado na fase inicial desta análise foi uma lupa Leica M420, pertencente ao Laboratório Geoazur vinculado a Universidade de Nice Sophia Antipolis – França. A lupa utilizada no restante das análises pertence ao Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) vinculado ao Instituto de Geociências da UFRGS. O modelo é Leica MZ 125 e os aumentos utilizados variavam de 25 a 100 vezes.

### Limitação do método

Deve-se ressaltar que a lupa possui limitações quanto à capacidade de aumento. Sendo assim, frações de tamanho muito pequeno não puderam ser analisadas por este método. Portanto, somente as amostras com tamanho de grão maior que 10  $\mu\text{m}$  foram analisadas.

## 3.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX)

### Princípios e instrumentação

O princípio da análise por difratometria de raios X baseia-se no comportamento das ondas eletromagnéticas de raios X quando entram em contato com uma amostra, seja esta na forma de cristais milimétricos, como pó ou como filme (Goldstein *et al.*, 2007). A forma como a amostra é analisada depende do tipo de informação que se busca obter com a análise. Por exemplo, usam-se cristais quando se deseja entender o espaçamento entre as camadas internas paralelas à algum eixo específico do cristal. Caso deseje-se um detalhamento sobre toda variedade de espaçamentos de um mineral, sugere-se a análise em pó, pois lá as partículas serão muito finas e estarão de forma desorientada, de forma que a probabilidade de enxergar os planos paralelos e oblíquos a todos os eixos cristalinos se torna maior, o que permite uma análise estatística e geométrica sobre as mais variáveis faces do mineral.

Antes de iniciar-se a explicação do método em si, deve-se lembrar alguns princípios básicos que envolvem os raios X. Primeiramente, é uma radiação eletromagnética que se assemelha à luz visível, a não ser pelo fato de seu comprimento de onda ser muito menor, o que permite a propagação da mesma através de corpos, contrariamente à luz visível. Sendo assim, é possível analisar materiais muito finos, pois

as ondas, menores e mais energéticas, conseguem penetrar a matéria de forma mais eficaz que outras radiações.

Para se produzir um raio X é necessário, além de uma fonte e meio propagável, alta voltagem e a condição de desaceleração das partículas eletricamente carregadas que foram emitidas pela fonte. Ou seja, dentro do tubo gerador de raios X existem dois principais componentes, a fonte de elétrons (catodo) e dois eletrodos metálicos de alta voltagem (anti-catodo ou anodo). Quando os elétrons começam a ser bombardeados no vácuo eles são direcionados para um alvo composto de metais como Cu, Mo, Cr, W, Fe ou Au. Ao interagir com o anodo, radiação será gerada com diversas energias e frequências. Para direcionar somente os raios X, tem-se uma janela pela qual os raios passam e vão de encontro com o material a ser analisado, assim agindo como um filtro.

Ao bombardear o alvo metálico, existem duas formas de radiação x que são geradas pela interação entre os elétrons e o alvo. Uma delas é a radiação contínua, também chamada de radiação branca, que é representada por curvas policromáticas, ou seja, que possuem diversos comprimentos de onda associados, e que dependem da voltagem utilizada no tubo e também do material constituinte do anodo. É formada a partir da desaceleração gradual dos elétrons, o que também resulta em uma diminuição energética da radiação. A outra radiação é a característica, também chamada de espectro característico, e é gerada a partir da parada abrupta os elétrons. Diferentemente do espectro contínuo, o característico irá gerar picos, e não curvas, pois seu resultado é proveniente de transações de elétrons nos níveis energéticos do átomo. Brevemente explica-se que, ao ser bombardeado por elétrons, a estrutura do átomo fica desequilibrada, assim expelindo um elétron de sua camada mais interna, a K. Devido ao desequilíbrio gerado, elétrons de outras camadas tendem a assumir o local daquele recém expelido. Elétrons da camada L deslocam-se para a K, de forma que esta mudança de nível energético gera o  $K\alpha$  e então se retorna ao equilíbrio. Similarmente é formado o  $K\beta$ , porém relacionando-se a substituição de um elétron da camada L por um da M. Esse é o processo de geração dos espectros característicos  $K\alpha_1$ ,  $K\alpha_2$  e  $K\beta_1$ . O comprimento de onda das radiações emitidas é característico de cada elemento, ou seja, pode-se saber a composição do material analisado a partir destes valores.

O processo de difração de raios X para análise de estruturas minerais segue a Lei de Bragg, que explica como é possível descobrir o espaçamento atômico a partir da

utilização dos raios. Primeiro deve-se saber que o feixe de raios X emitido na amostra é na verdade um conjunto de ondas, e devido a isso interações ocorrem, gerando interferências. Isso quer dizer que, quando duas ondas encontram-se em fase, elas reagem de forma a gerar uma onda com maior amplitude, pois as demais se somaram. O oposto ocorre com ondas em fases diferentes, onde os valores são subtraídos, podendo até se anularem completamente. No caso da difratometria é necessário que as ondas estejam em mesma fase.

A Lei de Bragg demonstra que é possível descobrir o espaçamento interatômico de um material e parte do princípio de que as características dos raios refletidos são produtos das propriedades internas do mineral. Exemplifica-se com a emissão de dois feixes de raio x paralelos, incidindo a  $\theta$  e sendo refletido a  $\theta$  também. Porém, dependendo do plano atômico que o raio incide, ele irá percorrer maior distância do que aqueles que não penetram tanto na matéria. Sendo assim, se esse adicional de distância for proporcional ao comprimento de onda, então os feixes continuam em fase ao serem refletidos, o que permite a análise.

A partir desta demonstração tem-se a Lei de Bragg dada pela equação  $n\lambda=2d\sin\Theta$ , onde:  $\Theta$ = ângulo de difração (ângulo entre o feixe incidente e o feixe difratado);  $\lambda$ = comprimento de onda;  $d$ = espaçamento entre camadas;  $n$ = número inteiro de comprimentos de onda. Esta equação é utilizada para descobrir o valor “ $d$ ”, que consiste no espaçamento entre camadas característico de cada mineral, essencial para sua identificação. Sendo assim, a partir da incidência de diversos raios em diversos ângulos é possível coletar um banco de dados quanto aos espaçamentos da amostra, gerando então um gráfico unidimensional que representa a intensidade do raio X refletido pela amostra, em angstrom (pois as células unitárias são geralmente representadas nessa unidade, mas também pode ser em nm), e o ângulo de incidência dos raios refletidos, medido por  $2\Theta$ . A partir do valor ‘ $d$ ’ descoberto recorre-se a tabela Miller Index, que lista todos os espaçamentos relativos aos minerais.

A instrumentação do método é através de um difratômetro, que é composto de três peças características. O tubo gerador de raios X, que produz um feixe monocromático que incide na amostra. O detector eletrônico que irá registrar a taxa de radiação refletida em *counts/sec*. E o goniômetro, que é o mecanismo que propicia a movimentação angular do tubo e do detector, registrando todos os ângulos de incidência

dos raios. Também se tem uma peça que é responsável por segurar a amostra. Deve-se mencionar que a amostra deve ser depositada em uma lâmina de vidro, pois este é um composto amorfo e não irá interferir nas leituras, ou seja, se algum raio refletido passar pelo vidro nenhum pico será registrado.

#### *Método do pó (conceituação e preparação)*

O método do pó consiste na análise de material moído e posicionado de forma desorientada na lâmina receptora. Quando se estuda uma única fase mineral, este tipo de análise propicia um conhecimento vasto quanto aos mais diversos planos atômicos do mineral. Pelos grãos estarem desorientados, os feixes de raios x incidem sobre diferentes planos, assim refletindo uma grande quantidade de valores para os mais variados planos de um mineral. A partir de todos estes valores, podem-se calcular todos os espaçamentos e assim tridimensionar a estrutura cristalina do mineral. Quando se utiliza este método para amostras de composição muito variável, ele propicia o conhecimento das mais diversas mineralogias associadas, podendo também fornecer uma noção quanto à representatividade de cada mineral na amostra, através do estudo das intensidades relativas dos picos gerados.

Para preparar a amostra para esse método deve-se primeiramente moer de forma bem fina o material. Após esta primeira etapa dispõe-se o pó em uma lâmina de vidro com uma pequena cavidade circular com cerca de 5 mm de diâmetro e pressiona-se o material com uma lâmina de forma a “compactá-lo” para evitar escape no momento da incidência dos raios X .

#### *Método das amostras orientadas na forma natural (conceituação e preparação)*

O método das orientadas na forma natural consiste em uma análise muito similar ao do pó, porém com o diferencial de ser focado na identificação de argilominerais e filossilicatos. Como o eixo responsável pela caracterização destes minerais é o Z, buscase orientar os grãos de acordo com essa posição, de forma que quando o feixe de raios X incida, ele percorra este eixo, assim provendo a distância  $d$  entre suas camadas. Devido a similaridade química e tamanho muito pequeno, a descrição das características de cada camada da estrutura mineral se faz necessária para diferenciação destes minerais.

Devido à granulometria já muito fina da fração desejada para a análise ( $< 10 \mu\text{m}$ ), não foi necessário realizar a moagem do material. Assim sendo, se fez uma

solução com cerca de 2 ml de água corrente, o que não atribui qualquer tipo de interferência na estrutura mineral. Para deixar a solução o mais homogênea possível foi utilizado um ultrassom com ponta por um período que variava de 3 segundos até 5 minutos, dependendo da dificuldade de homogeneização de cada amostra (identificada pela presença de placas de agregação dos argilominerais). Após este processo, parte deste líquido foi recolhido com uma pipeta e depositado em uma lâmina de vidro de cerca de 5 cm por 5 cm. Ali o líquido foi deixado para que secasse de forma natural, tendo como objetivo o assentamento orientado, e orientação, das lâminas dos minerais de acordo com seu eixo Z.

#### *Método das amostras orientadas com adição de etilenoglicol (conceituação e preparação)*

Este método foi desenvolvido com a finalidade de diferenciar minerais que possuem mesmo espaçamento interatômico, ou seja, que são facilmente confundidos em análises de difratometria. O seu princípio é de que ao se adicionar etilenoglicol, alguns minerais terão seu espaçamento aumentado, pois possuem estrutura mais aberta. O reflexo desta alteração estrutural se dá na redução e movimentação de picos quando comparados ao difratograma da análise natural. Esta técnica é utilizada principalmente para diferenciar clorita de esmectita, pois ambas apresentam valor  $14\text{Å}$  no plano 001. Ao glicolar, a esmectita, que possui maior abertura estrutural, irá expandir e redirecionar seu pico para  $17\text{Å}$ , enquanto que a clorita, mais fechada, permanecerá com  $14\text{Å}$ .

A preparação do material para este método consiste na saturação da lâmina orientada natural com etilenoglicol. Deixou-se secar e após se fez a análise de difratometria. Usou-se a mesma lâmina da análise natural pois comumente realizam-se as duas análises de forma que os dados se complementem.

#### Aplicação neste estudo

As análises de difratometria foram essenciais neste projeto, pois possibilitaram a identificação dos filossilicatos presentes na fração amostrada  $< 10\ \mu\text{m}$ , que não são possíveis de identificação em lupas. Adicionalmente a isso, esta técnica informou a composição total de cada uma das frações, essencial para a devida caracterização mineralógica das amostras.

### Condições analíticas e equipamento

Nas análises pelo método do pó nas amostras com presença de minerais pesados o intervalo de varredura do goniômetro foi de 2° a 70°. Quanto às análises nos materiais sem minerais pesados, o intervalo foi de 4° a 50°. Devido à pouca quantidade de material disponível da fração < 10 µm, as análises das amostras orientadas foram realizadas com velocidade de 2 segundos para 0,01°, pois a resposta aos raios X provavelmente seria menor caso a análise fosse mais veloz. Sendo assim, aumentou-se o tempo de contagem. O intervalo de varredura do goniômetro de foi de 2° a 35°, pois sabia-se que os picos mais característicos dos argilominerais ocorreriam neste intervalo.

O equipamento utilizado é um difratômetro SIEMENS modelo BRUKER-AXS D5000 (Figura 14), com condições de energia de 25 mA e 40 kV, com radiação  $K\alpha$  e tubos de cobre, pertencente ao Laboratório de Difractometria de Raios X do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), vinculado ao Instituto de Geociências da UFRGS.



Figura 14 - Difratômetro de raios X, pertencente ao CPGq do IGEO-UFRGS.

### Limitações do método

A limitação deste método está restrita a cristalinidade e quantidade do material a ser analisado. Materiais pouco cristalinos e com quantidade inferior a 5% em relação ao

total da amostra são de difícil análise. Existem também algumas dificuldades em relação a este método, como a grande variedade composicional da amostra, propiciando assim a geração de diversos picos que por vezes se sobrepõem e tornam a qualificação do material mais difícil.

### 3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

#### Princípios e instrumentação

O princípio desta análise parte da premissa de que a interação entre elétrons e amostra gera uma série de emissões dos mais variados tipos, como elétrons secundários e retro-espalhados (Goldstein *et al.*, 2007). A coleta dos dados se dá a partir da varredura dos elétrons emitidos pela amostra, o que então fornece uma imagem que pode ser reflexo da topografia da amostra (*Secondary Electron Images* - SEI) ou de sua composição (*Backscattered Electron Images* -BEI). São cinco os principais setores do equipamento que permite a realização da técnica, sendo eles: fonte de elétrons; mecanismo de foco do feixe; mecanismo de varredura dos elétrons; mecanismo de detecção de elétrons e; display para o imageamento. Todos esses componentes encontram-se em uma câmara de vácuo que geralmente possuiu três setores para o “refinamento” do mesmo.

A fonte de elétrons consiste em um emissor de elétrons (catodo) que os acelera em direção à amostra. É composto por um filamento geralmente de tungstênio que é aquecido a uma corrente de cerca de 2,5 A, o suficiente para iniciar a liberação do material, permitindo assim o processo de emissão. Anexado ao filamento existe um eletrodo de carga negativa que tem a função de agir como uma rede, limitando a área de propagação dos elétrons, pois se deseja gerar um feixe fino e bem direcionado para interagir com a amostra. Para fortalecer ainda mais essa característica do feixe existe um anodo que o “filtra” ainda mais, pois possui uma leve abertura por onde o feixe bem direcionado deve passar, excluindo assim aqueles elétrons que não estão bem alinhados.

O sistema de foco do feixe, além do mencionado acima, é composto por lentes eletrônicas que consistem em um conjunto de lentes magnéticas que direcionam o feixe. Comumente são utilizados três pares de lentes que são magnetizadas (um polo positivo e o outro negativo) de forma a gerar um campo magnético que foca o feixe. O tipo de abertura utilizada também pode interferir no processo, pois lida diretamente com o

diâmetro do feixe. Geralmente a abertura é composta por um fino disco de platina ou molibdênio com uma pequena fissura, e deve-se estar sempre muito limpa, pois qualquer partícula que fique ali alojada irá gerar uma energia eletrostática que afetará diretamente o feixe. Vale ressaltar que quanto menor o diâmetro maior será a resolução na foto. Todos esses mecanismos são empregados para direcionar o feixe, pois ele tem a tendência de se “desorientar” quando carrega correntes não muito altas, como é o caso de quando se analisam materiais delicados como argilominerais.

O mecanismo de varredura dos elétrons, também reconhecido como *electron detectors*, é composto por três partes principais. O *photomultiplier scintillator* Everhart-Thornley, que age como o detector de elétrons, convertendo-os em um sinal elétrico de forma a amplificar o sinal para melhor quantificação. Anexado a ele existe um potencial positivo na forma de uma fina cobertura metálica que tem como intuito acelerar os elétrons que se direcionam ao detector. E na porção externa existe uma malha também de carga positiva que acelera os elétrons. Tais mecanismos de aceleração são necessários pois comumente os elétrons não tem energia o suficiente para chegar ao detector, principalmente os provenientes de análise SEI, e por isso se usam mecanismos para facilitar o transporte dos elétrons.

Os elétrons secundários (*Secondary Electron Images – SEI*) são aqueles que são expelidos da camada k a partir da interação do feixe de elétrons e a amostra, e por isso podem ser considerados elétrons de baixa energia, sendo originados muito próximos à amostra. Os dados são relativos à topografia da amostra, e quanto maior o brilho que uma porção da imagem possui, maior a quantidade de elétrons que ela está emitindo. Por isso as áreas altas e de relevo acentuado ficam muito bem registradas, pois quanto maior a área superficial, maior a área da qual elétrons estarão sendo retirados, e consequentemente maior a resolução.

Os elétrons retro-espalhados (*Backscattered Electron Images - BEI*) também são gerados a partir da interação do feixe com a amostra. Neste caso, elétrons provenientes do próprio feixe interagem com os átomos presentes no material e depois escapam. Cada elemento terá uma interação diferente com os elétrons, e isso pode ser verificado no fato de que quanto maior o número atômico do elemento, maior será o brilho referente a ele na imagem. Sendo assim, o BSE é utilizado para identificar minerais de

diferentes composições, pois eles terão diferentes tonalidades de cinza, e principalmente quando se deseja traçar transições composicionais dos minerais, como zonações.

### Preparação

#### *Fração superior a 10 $\mu\text{m}$*

Para efetuar a análise no material de granulometria superior a 10  $\mu\text{m}$  foi necessário fixar o material inconsolidado de interesse em uma fita de carbono e posteriormente em um *stub*. Essa fita além de ter propriedades aderentes age como um condutor que auxilia a propagação dos elétrons e conseqüente resolução da imagem. Duas formas de disposição de amostras foram empregadas, uma onde separaram-se grãos que precisam ser analisados individualmente, como carapaças de foraminíferos e minerais de coloração distinta, e amostragem randômica do sedimento para análise de proporções e possíveis relações entre cristais. Tal disposição de material pode ser visualizada na Figura 15A. Ressalta-se que este processo de montagem foi realizado tanto nas frações com presença quanto nas com ausência de minerais pesados. Quanto a metalização, foi realizada com carbono.

#### *Fração inferior a 10 $\mu\text{m}$*

Devido à granulometria desta fração e incapacidade de individualização de grãos em lupa, esta fração foi disposta randomicamente em fitas aderentes de carbono, como visto na Figura 15B. A metalização foi realizada primeiramente com carbono e depois com ouro, de forma a propiciar melhor resolução das imagens, visto que se buscava a caracterização morfológica de cristais da ordem de 5  $\mu\text{m}$ .

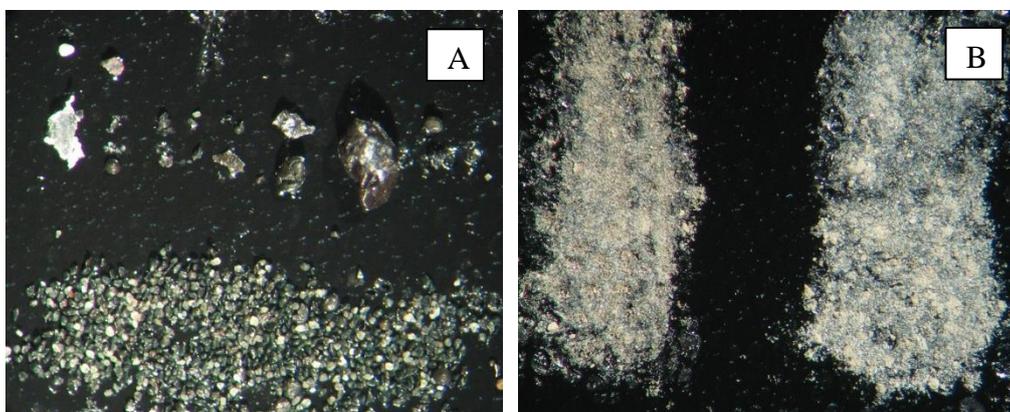


Figura 15 - (A) Fração superior a 10  $\mu\text{m}$  (aumento 100x) e (B) fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (aumento 100x) .

### Aplicação neste estudo

A importância desta técnica neste trabalho se deu pela necessidade de identificar as fases minerais e biológicas e também a relação entre os componentes do sedimento. Alguns minerais não puderam ser identificados somente com análise em lupa, devido limitações do equipamento, e para tal usou-se o MEV para gerar imagens de alta resolução que, em conjunto com a técnica semi-quantitativa de EDS, podem dar importantes informações quanto a mineralogia do material. Não somente para os minerais, mas os componentes biológicos também só puderam ser corretamente classificados com imageamento de suas diversas faces. No caso das porções randômicas, o método foi importante para estimar-se a proporção dos principais componentes e também as relações que os grãos tem entre si. Sendo assim, pode-se dizer que o MEV auxiliou na qualificação das amostras, principalmente no que diz respeito às porções mais grossas do sedimento.

### Condições analíticas e equipamento

As imagens coletadas pelo método possuem variações quanto as suas condições, pois diferentes intuitos e materiais requerem diferentes metodologias de análise. Todas as amostras de tamanho superior a 10  $\mu\text{m}$ , e consequentes imagens, foram expostas à corrente entre 15 e 20 kV. No caso das análises da fração argilosa e de algumas carapaças a corrente foi menor devido a delicadeza do material. A *working distance* variou entre 10 e 11 mm e o Spot Size entre 48 e 51. As amostras foram analisadas majoritariamente no método de elétrons secundários (SEI) e raramente pelo de elétrons retro-espalhados (BEI). O equipamento pertence ao Laboratório de Geologia Isotópica (LGI), vinculado ao Instituto de Geociências da UFRGS. Seu modelo é JEOL JSM-6610LV (Figura 16).



Figura 16 - MEV-EDS pertencente ao LGI do IGEO-UFRGS.

### Limitação do método

Devido a necessidade de metalização do material não é possível realizar mais observações em lupa uma vez que se utiliza deste método. Por isso, muito cuidado na logística das análises deve ser tomado. A capacidade de magnificação, apesar de ter grande alcance, pode por vezes ser considerada pequena quando se deseja analisar materiais extremamente finos.

## 3.6 ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

### Princípios e instrumentação

Esta técnica se deu em cooperação com a análise de MEV, visto que o dispositivo de EDS consiste em um detector acoplado (Goldstein *et al.*, 2007). Como mencionado anteriormente, diversas são as formas de emissão de energia que a matéria dispõe ao interagir com um feixe de elétrons altamente energéticos. Dentre essas emissões, o detector EDS tem a habilidade de detectar os raios X característicos, que são finas linhas de emissão típicas de cada elemento da tabela periódica. Sendo assim, a partir da identificação destes picos e suas relativas intensidades é possível quantificar os elementos presentes na amostra. O EDS dispõe de diversas funcionalidades, suas análises podem ser tanto quantitativas quanto semi-quantitativas, e neste trabalho a utilizada foi a do segundo tipo.

Além de análises pontuais precisas, este método permite realizar um mapeamento composicional da amostra a partir da ferramenta de *mapping*. Sendo assim, pode-se criar um mapa da área desejada visando a proporção relativa dos elementos que se deseja analisar. Desta forma mapas com variação na intensidade das cores representam a abundância relativa dos elementos no material analisado.

### Preparação

A preparação para este método consiste na preparação para o MEV, pois as técnicas são utilizadas em conjunto. Como já mencionado, as frações superiores a 10 µm foram metalizadas com carbono, enquanto que a inferior foi metalizada com carbono e ouro. Deve-se mencionar que ao dispor os cristais na fita de carbono tomou-se o cuidado de colocá-los com as faces planas paralelas a superfície. Tal fato se dá pela maior eficácia de análise quando a superfície analisada é plana e perpendicular ao feixe.

### Aplicação neste estudo

A utilização do EDS neste trabalho é essencial pois possibilita a caracterização mineralógica da amostra, o que é muito complicado quando tenta-se fazer o mesmo através de análise em lupa. Seja estimando proporções entre as diferentes fases minerais nas porções de amostras randômicas ou na classificação dos grãos, esta técnica permite que todos os componentes sejam devidamente descritos.

### Condições analíticas e equipamento

As análises foram realizadas a uma corrente que variava entre 10 e 15 kV, sendo que quanto maior a corrente, melhor a resposta do material e conseqüente detecção. O equipamento utilizado foi Bruker Nano X Flash Detector 5030 (Figura 16), pertencente ao Laboratório de Geologia Isotópica (LGI), vinculado ao Instituto de Geociências da UFRGS.

### Limitações do método

Este método, de acordo com as limitações do equipamento, é considerado do tipo semi-quantitativo.

## 3.7 MICROSSONDA ELETRÔNICA (ME)

### Princípios e instrumentação

O método de análise por microsonda eletrônica (ME) assemelha-se muito à análise por espectroscopia por dispersão em energia (EDS) em microscopia eletrônica de varredura (MEV), pois parte do mesmo princípio de que uma amostra bombardeada por elétrons irá gerar uma série de emissões, sendo as de raios X com comprimentos de onda característicos os importantes para este método (Reed, 2005). O principal diferencial entre estas técnicas está na precisão do método. No caso, a microsonda é capaz de identificar concentrações elementares de até 10 ppm. Para melhor detalhamento dos processos de emissão e interação entre feixe de elétrons e amostra, sugere-se a leitura do item sobre MEV-EDS.

O método de detecção dos raios X característicos emitidos é a partir de espectroscopia por dispersão em comprimento de onda (*Wavelength Dispersive*

*Spectroscopy* - WDS). Ele seleciona, a partir da Lei de Bragg, aqueles comprimentos de onda de interesse e os direciona para os detectores que irão então fazer as medidas relativas das emissões. Para determinar com exatidão a composição química do material, usam-se de padrões de elementos de interesse de forma a traçar uma comparação entre um material de composição conhecida e o material a ser analisado.

### Preparação

Para esse tipo de análise é necessário material muito bem polido, de forma que quando o feixe incida não haja arestas que possam desviar as emissões. Devido ao fato do material analisado neste trabalho ser constituído de sedimentos inconsolidados, uma preparação especial foi requerida. Usou-se um molde de silicone para a confecção de um *mount* de resina epoxi de cerca de 1 cm de altura por 2,5 cm de diâmetro.

No caso da fração superior a 10  $\mu\text{m}$ , alguns grãos foram individualizados e dispostos em uma fita adesiva na base do molde, de forma que ao se colocar a resina o material não se movesse. Quanto à fração inferior a 10  $\mu\text{m}$ , primeiramente pequenas quantidades do material foram prensadas de forma a gerar uma fina lâmina (Figura 17a e b). Estas lâminas com poucos milímetros de largura foram dispostas na fita adesiva na base do molde e então resinadas. Após resinamento foi realizado polimento com pasta de diamante, para evitar contaminação que poderia ocorrer com outras pastas.

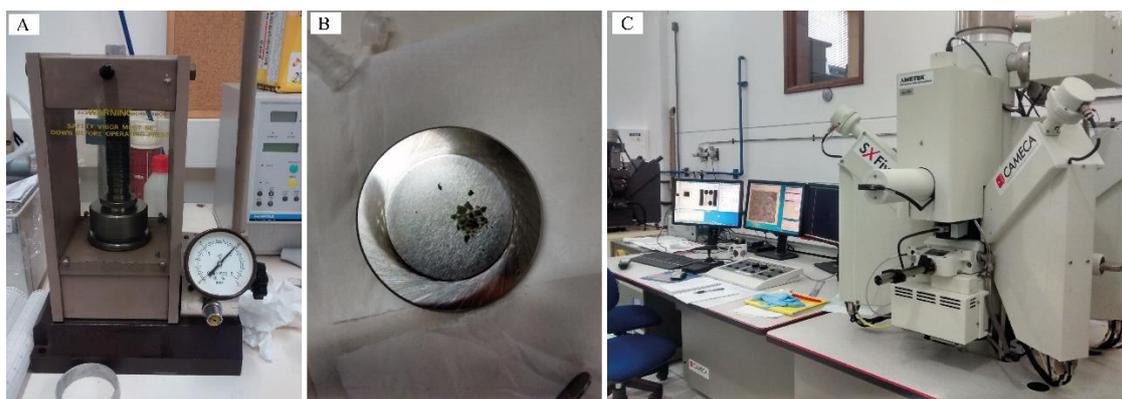


Figura 17 - (A) Prensa para confecção de pastilhas, (B) pastilha pronta e (C) microsonda pertencente ao CPGq, do IGEO-UFRGS.

### Condições analíticas e equipamento

O equipamento utilizado foi uma Microsonda Eletrônica por Varredura SXFive do Laboratório de Microsonda Eletrônica pertencente ao CPGq, vinculado ao Instituto

de Geociências da UFRGS (Figura 17 C). As condições foram de diâmetro do feixe inferior a 1  $\mu\text{m}$  e a calibração foi feita para os elementos Si, Al, Mg, K, Fe, Ti e Ca.

#### Limitação do método

Este método se apresenta eficaz no que diz respeito à análise de elementos maiores e menores. Elementos traço comumente não são identificados. A qualidade do dado também está diretamente relacionada ao polimento da amostra. Aquelas com baixa qualidade de polimento costumam apresentar dados de menor qualidade. Algumas dificuldades são impostas no que diz respeito aos elementos que se deseja analisar pois, por vezes, os laboratório não dispõem dos padrões necessários.

#### 4 RESULTADOS

Os resultados são apresentados por amostra, e estão ordenados de acordo com as características mais representativas da amostra. Primeiramente tem-se a estimativa dos constituintes (minerais e componentes biológicos) mais abundantes, subdivididos em classes de acordo com suas características físicas, visto que esta foi a forma escolhida para se caracterizar as proporções relativas a partir de análises de lupa. Posteriormente breves descrições das diferentes frações foram realizadas. O aspecto geral das frações com “presença abundante de minerais pesados” e “ausência de minerais pesados” foi descrito por ortoscopia. Quanto a mineralogia da amostra, inicia com descrição dos componentes majoritários a partir dos resultados obtidos por difratometria de raios X, e segue com descrições detalhadas das fases minerais por análise por MEV-EDS. Após a caracterização do material de granulometria superior a 10  $\mu\text{m}$  se tem a descrição do material inferior a 10  $\mu\text{m}$ . Esta etapa se inicia com descrição do material por MEV e posteriormente por difratometria de raios X e microssonda.

Sendo assim, a partir das análises em ortoscopia algumas características puderam ser traçadas nas frações maiores que 10  $\mu\text{m}$ , tais como proporções relativas entre principais grupos minerais/microrganismos e presença de grãos incomuns à amostra. As estimativas e definição de grãos incomuns foram realizadas a partir de observação, portanto são qualitativas. Sete principais classes foram definidas a partir do estudo de características distintivas dos grãos para facilitar delimitação das proporções, seguindo as seguintes características:

- *Classe 1:* Quartzo, feldspato, carbonato e apatita, com esfericidade e angulosidade variando de muito boa a muito ruim, sem coloração ou com leve tonalidade esbranquiçada, de diafaneidade transparente a translúcida. Os cristais podem apresentar inclusões e ocorrer de granulometrias variadas.
- *Classe 2:* Fragmentos de minerais de coloração bege, com superfície irregular, muito muito angulosos e com baixa esfericidade. Hábito anédrico e geralmente de tamanho reduzido em comparação ao restante da amostra, podendo ser considerado uma espécie de matriz. Por vezes também é composta por fragmentos de microfósseis indistinguíveis em lupa.

- *Classe 3:* Anfibólio, piroxênio, clorita, epidoto e turmalina de coloração que varia entre preto e verde escuro. Podem ocorrer anédricos a subédricos, por vezes com hábito prismático e com clivagem.

- *Classe 4:* Minerais micáceos como biotita, muscovita, glauconita e flogopita, com coloração que varia entre incolor, cinza claro e marrom escuro. O hábito é placoide ou foliar, com diafanidade que varia entre transparente e opaco.

- *Classe 5:* Resquícios biológicos. Inclui fragmentos e carapaças inteiras, escamas e dentes.

- *Classe 5A:* Fragmentos e/ou carapaças intactas de microfósseis variados. Podendo variar de carapaças silicosas a carbonáticas, das mais variadas espécies. Com coloração que varia do branco ao bege avermelhado, do translúcido ao opaco.

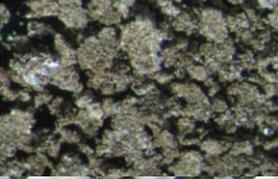
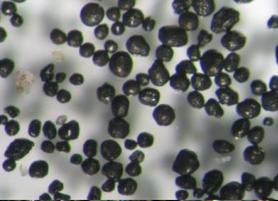
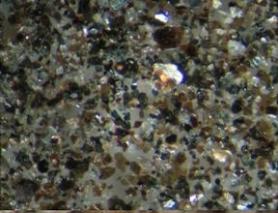
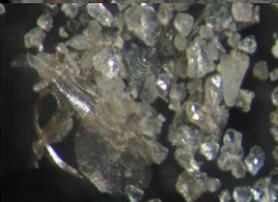
- *Classe 5B:* Fragmentos de conchas, sem hábito definido e com feições de quebra. Opaco de coloração branca, cinza, bege e lilás, podendo apresentar ranhuras relativas ao crescimento da carapaça.

- *Classe 5C:* Fragmentos de matéria orgânica na forma de dentes e escamas de peixes, esta última sem hábito definido, de coloração marrom e translúcida, apresentando estrias.

- *Classe 6:* Granada, topázio e outros minerais de coloração muito variada e distinta, com esfericidade e angulosidade muito variável, assim como a diafanidade.

- *Classe 7:* Minerais que não se adequam a nenhuma das classes anteriores e não são representativos nas amostras.

As características estão resumidas no Quadro 6 e foram usadas para estabelecer classes de forma a facilitar a identificação de proporções relativas entre os principais componentes das amostras.

Classe	Características	Minerais	Imagem
Classe 1	Incolor, transparente a translúcido e de angulosidade e esfericidade variáveis	Quartzo, feldspato, carbonato, apatita, zircão, silimanita	
Classe 2	Bege, opaco e forma aglomerados de tamanho reduzido	Fragmentos de microfósseis e minerais variáveis	
Classe 3	Verde, cinza ou preto, opacos e de angulosidade e esfericidade variáveis	Anfíbólio, piroxênio, olivina, epidoto	
Classe 4	Incolor, cinza e marrom, translúcidos e placóides	Micas	
Classe 5A	Branco a bege, translúcido a opaco	Carapaças a microfósseis	
Classe 5B	Branco, bege a lilás, opaco e anguloso	Fragmentos de conchas	
Classe 5C	Translúcido com cor castanha/avermelhada	Fragmentos de matéria orgânica	
Classe 6	Cores variadas, translúcido a opaco e de angulosidade e esfericidade variáveis	Óxidos, sulfetos, sulfatos e outros	
Classe 7	Outros	Minerais que não se adequam nas demais classes	

Quadro 6 - Classes minerais e suas características.

Algumas considerações quanto à classificação mineralógica deve ser realizada com a finalidade de melhor compreensão dos critérios neste trabalho utilizados para definir a mineralogia de cada grão. Devido às limitações do método de análise por EDS em superfícies não polidas, não é possível precisar a composição química dos minerais, mas é possível classificá-los em grandes grupos. Estes que apresentam variedade composicional estão listados na Quadro 7 com as considerações de classificação.

Grupo Mineral	Composição predominante	Classificação
Feldspatos	Sódica	Albita
	Cálcica	Anortita
	Sódica + Cálcica	Plagioclásio
	Potássica	K-feldspato
Anfibólio	Cálcico	Clinoanfibólio
	Fe-Magnésiano	Ortoanfibólio
Piroxênio	Fe-Magnésiano	Ortopiroxênio
	Cálcico	Clinopiroxênio

Quadro 7 - Classificação mineral simplificada.

As imagens provenientes de MEV estão disponíveis no apêndice deste trabalho. Imagens de aspecto geral de cada amostra estão no Apêndice I e imagens referentes aos componentes biológicos estão no Apêndice II.

#### 4.1 Amostra 20010

A estimativa de proporções minerais desta amostra, realizada em lupa, consiste em Classe 1 (70%), Classe 2 (20%) e Classe 7 (10%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta abundância de minerais incolores com angulosidade variada. Subordinadamente tem-se cristais opacos, alaranjados e flocos de material mais fino de tonalidade bege. A granulometria varia de silte, que compõe os flocos (Figura 20 B), a areia muito fina, que compõe a maior parte da amostra, e areia média, restrita a poucos grãos mais arredondados e escassos (Figura 18 A e D).

##### *Fração com presença de minerais pesados*

Esta porção da amostra apresenta coloração bege e aspecto “floculado”, que pode ser muito bem observado a partir de imagens de MEV, assim como em observação por lupa. Cada uma destas porções de acumulação de grãos pode variar entre os tamanhos silte e areia média. Apesar desta forma de ocorrência, pode-se identificar que a granulometria dos cristais constituintes da amostra variam de areia fina à argila, sendo a fração siltica predominante, seguida pela argilosa. A seleção do material é baixa e o hábito dos grãos é de grande variabilidade, assim como seus graus de esfericidade e arredondamento (Figura 18 B).

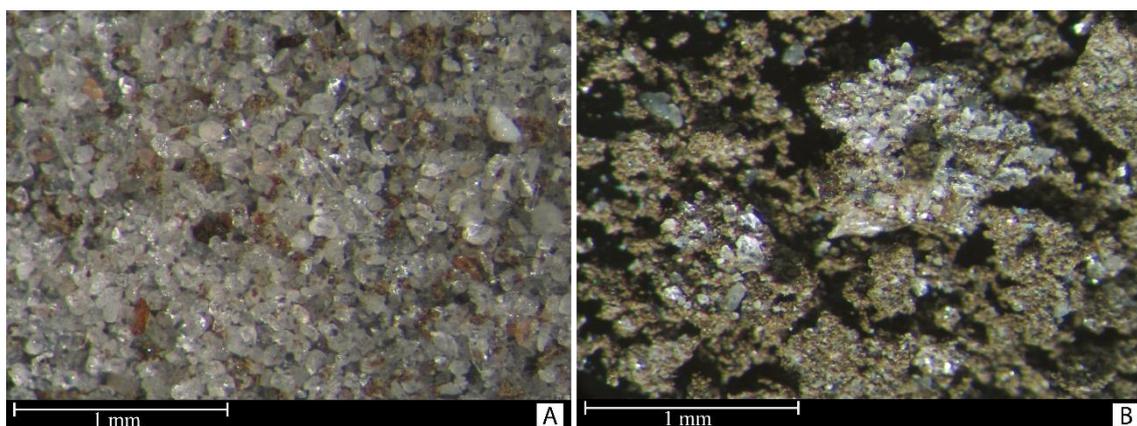


Figura 18 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

### *Mineralogia*

Quando analisada pela difratometria de raios X, a fração com presença de minerais pesados apresentou mineralogia relativamente simplificada. Foram identificados micas, quartzo, feldspatos e calcita. Existe também a presença de *bumps* que são ocasionados pela presença de material amorfo (Figura 19 A).

A amostra apresenta diversas variedades de **quartzo** (Figura 20 A). Este pode ocorrer de forma incolor, cinza e até mesmo rosado. Comumente é anguloso e com baixa esfericidade e por vezes ocorre de tamanho superior à moda da amostra. Alguns cristais de quartzo apresentam inclusões de óxidos de alumínio. **K-feldspatos** também ocorrem com tonalidade similar ao quartzo, sendo incolores, rosados ou pretos. O principal critério para diferenciar estas espécies é o grau de arredondamento e esfericidade, maior nos feldspatos. Também apresentam variabilidade quanto ao tamanho de grão. De tonalidade cinza identificou-se **albita** raramente na amostra.

**Apatita**, assim como o quartzo, possui diversas tonalidades, sendo incolor, cinza, marrom, laranja e preto. Seu hábito varia de totalmente anédrico até prismático, muitas vezes com tamanhos de grão proeminente e estruturas superficiais distintas, como ranhuras. De tonalidade cinza tem-se **diopsídio** (Figura 20 C), que varia de translúcido à opaco.

Alguns componentes biogênicos foram identificados, como é o caso de **espículas de esponjas**, de composição quartzosa. **Diatomáceas** ocorrem em tonalidade branca, também de composição quartzosa, ou preta, de composição apatítica. Também composto por fósforo e cálcio tem-se **escamas** de tonalidade bege e translúcidos. Muito raramente são encontrados fragmentos de **escolocodontes** e de **foraminíferos** bentônicos (ver Apêndice).

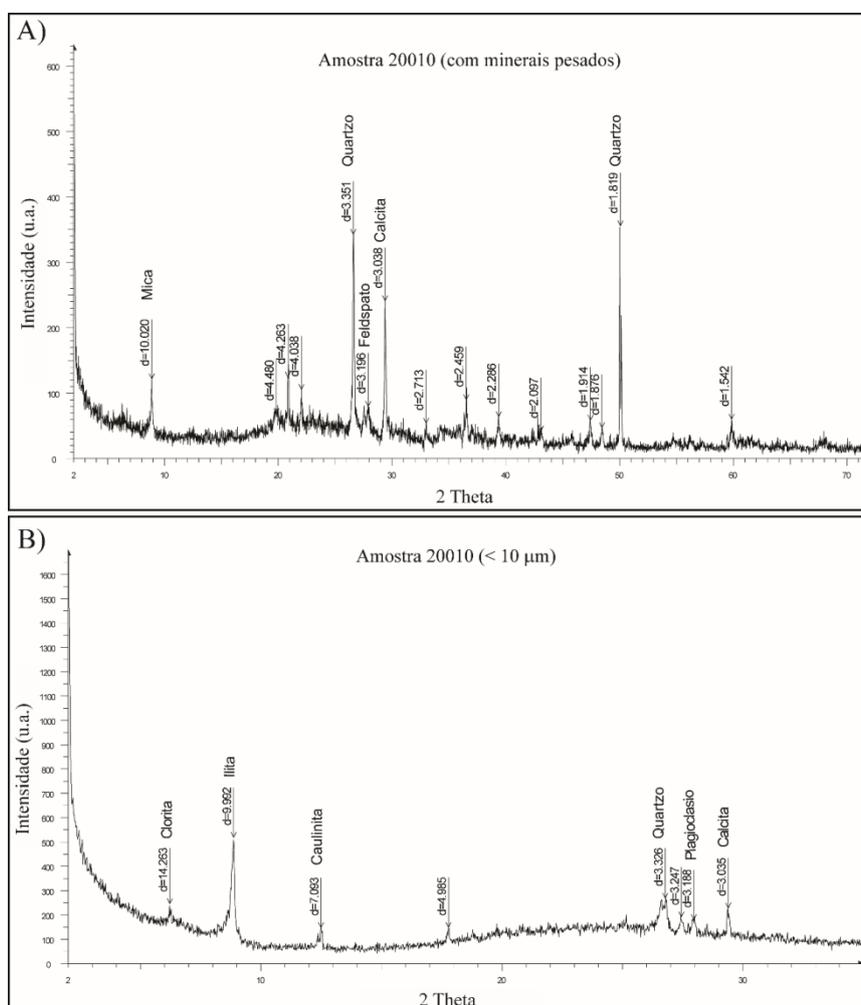


Figura 19 - Difratograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a  $10 \mu\text{m}$  (B).

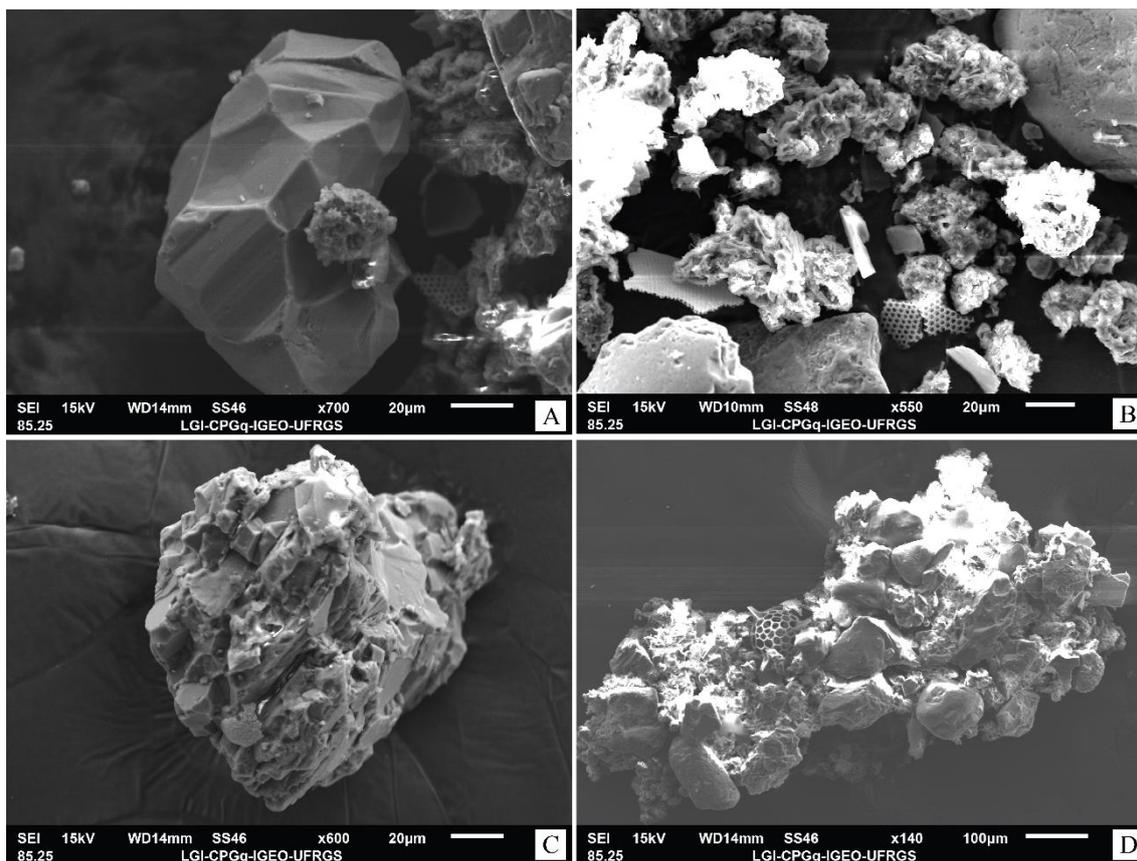


Figura 20- Grão de quartzo facetado (A), aspecto geral do material floculado (B), grão de diopside (C) e imagem aproximada do material floculado (D).

#### *Fração inferior a 10 $\mu\text{m}$*

Diversos fragmentos de microorganismos foram identificados, compondo cerca de 50% da amostra. Os mais abundantes são de **diatomáceas**, que apresentam grande variabilidade no padrão e tamanho de seus orifícios, variando de 1 a 0,3  $\mu\text{m}$ , geralmente circulares. **Espículas de esponjas** de cerca de 30  $\mu\text{m}$  foram identificados raramente (Figura 21 A e B).

Quanto a composição destes sedimentos, a partir da análise por DRX foram identificados os minerais clorita, illita, caulinita, quartzo, plagioclásio e calcita. Destaca-se que a composição dos componentes biológicos são de quartzo e de calcita, por isso o aparecimento destes picos no difratograma (Figura 19 B).

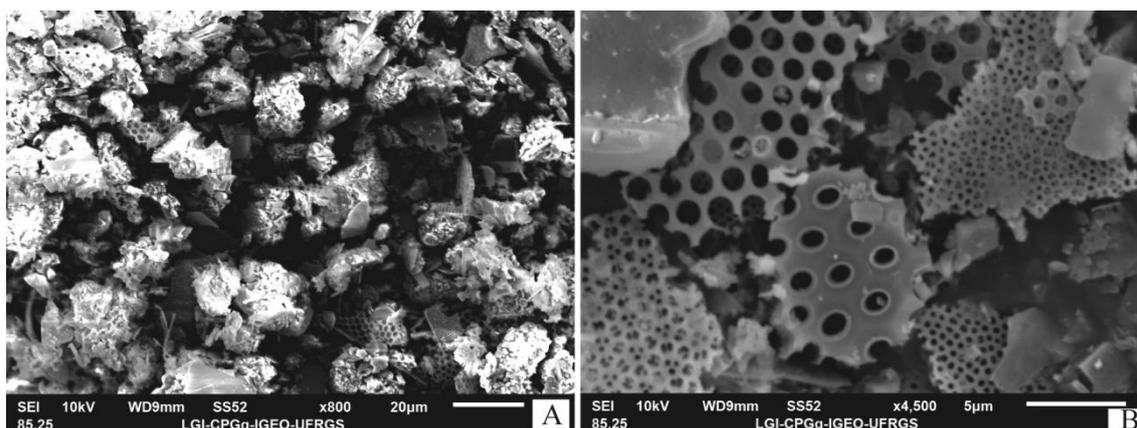


Figura 21 - Aspecto geral da fração argilosa (A) e diferentes tipos de diatomáceas (B).

#### 4.2 Amostra 23002

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (80%), Classe 3 (15%) e Classe 4 (5%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração quando observada em lupa apresenta tonalidade bege claro e granulometria muito fina. É composta majoritariamente por cristais incolores e esbranquiçados. Parte deste material incolor apresenta hábito acicular, sendo assim classificado como espículas de esponja. Raramente são identificados cristais pretos e esbranquiçados. A granulometria é siltica, mas o material acicular pode chegar até areia muito fina.

##### *Fração com presença de minerais pesados*

A ocorrência mineral desta fração é muito similar à da fração sem pesados, sendo a principal diferença a quantidade de minerais pretos e opacos, que nesta é maior. A granulometria é predominantemente silte, sendo os componentes de espículas de esponjas de tamanho até areia muito fina.

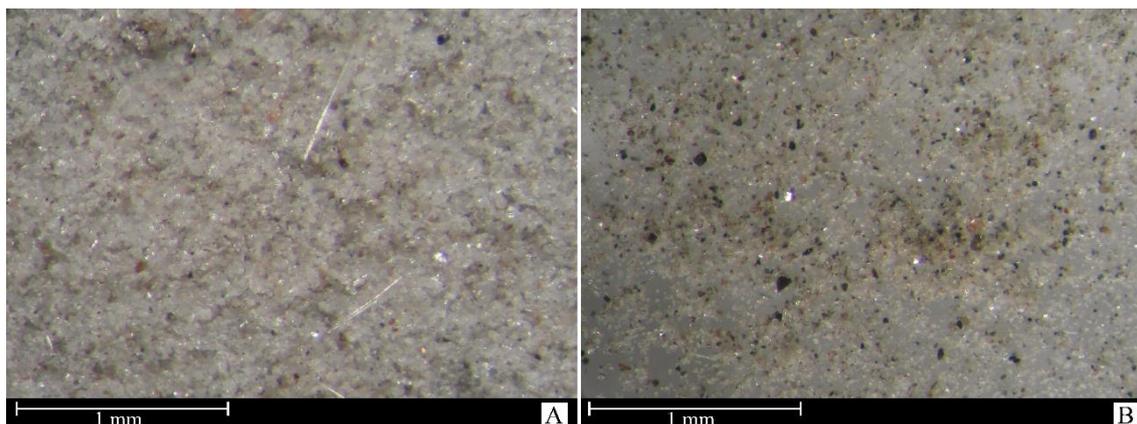


Figura 22 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

### *Mineralogia*

A fração com maior concentração de minerais pesados foi qualificada a partir de análises por difratometria de raios X e mostrou mineralogia majoritária relativamente abrangente. Tem-se micas, anfibólios, caulinita, quartzo e feldspatos (Figura 23 A).

Esta amostra tem como principal constituinte **quartzo**, que ocorre incolor ou alaranjado e sempre anguloso. **Albita** também ocorre nessas mesmas tonalidades sendo os critérios para diferenciação a presença de inclusões pretas nos cristais incolores e o moderado arredondamento nos cristais alaranjados. Raramente são identificados grãos alaranjados de **apatita**.

**K-feldspato** foi identificado com hábito prismático e tonalidade cinza, enquanto que **plagioclásio** esverdeado e ocorrem anédrico porém bem arredondado. Escassamente foram identificados cristais marrons de **biotita** e incolores de **muscovita**.

Componentes biológicos foram identificados, como **espículas de esponjas** (Figura 24 A) incolores compostas por quartzo e fragmentos de possível rádula de **gastrópode**, incolores.

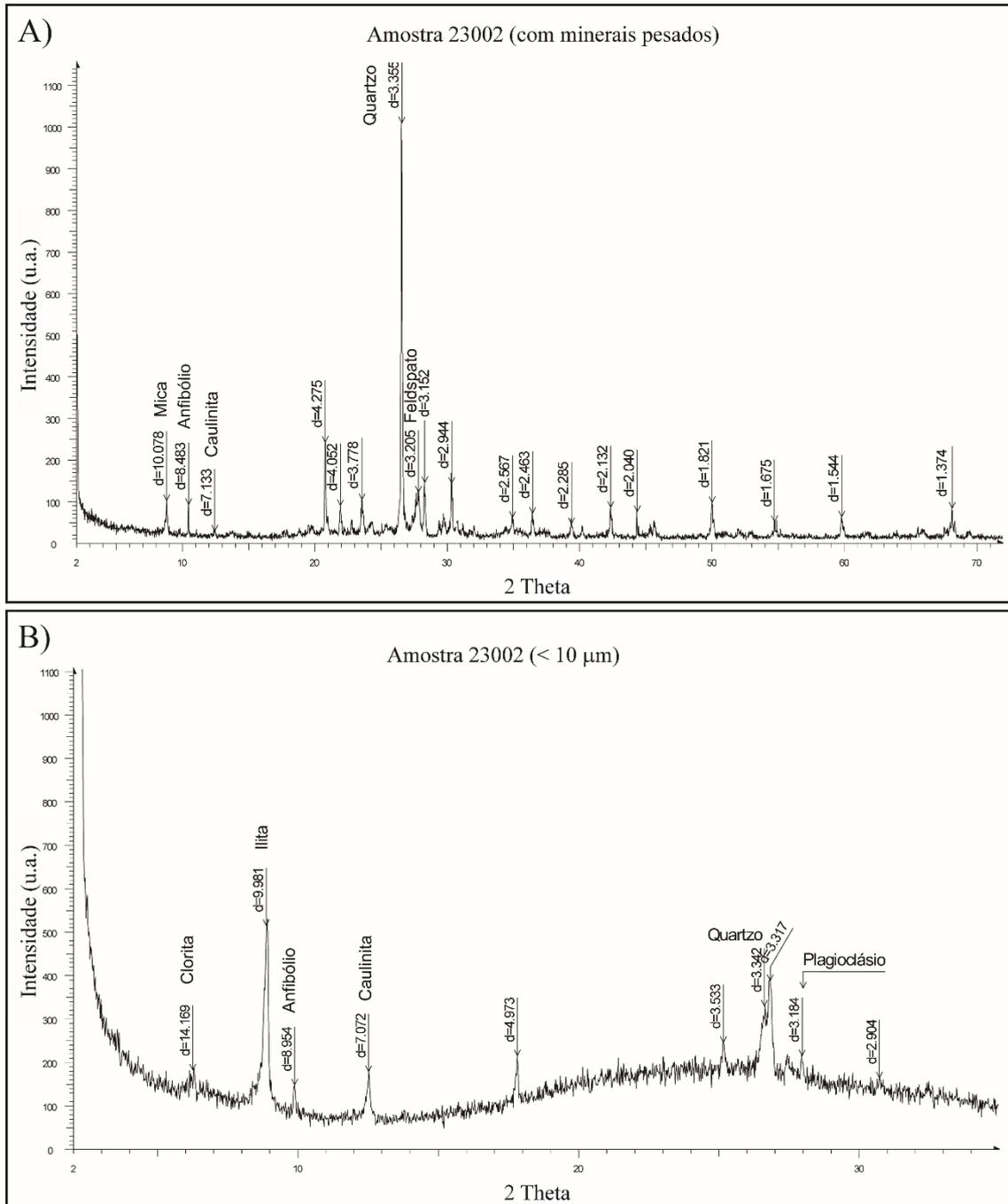


Figura 23 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

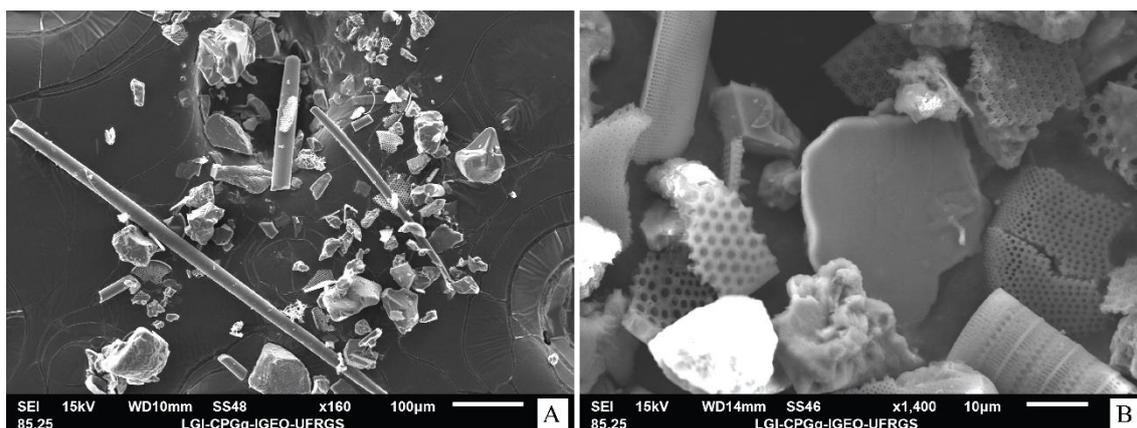


Figura 24 - Espícula de esponja (A) e fragmentos de diatomáceas (B).

#### *Fração inferior a 10 µm*

Esta fração da amostra apresenta abundantes fragmentos de **diatomáceas** (Figura 24 B e 25 B), com orifícios de diversas formas e tamanhos, que compõem cerca de 90% da amostra. Raramente são identificados organismos esféricos com ornamentação (Figura 25 A).

As análises por DRX evidenciaram a presença de clorita, ilita, caulinita, quartzo, plagioclásio e dolomita. A presença de material quartzoso se dá pela existência de diatomáceas em abundância (Figura 23 B).

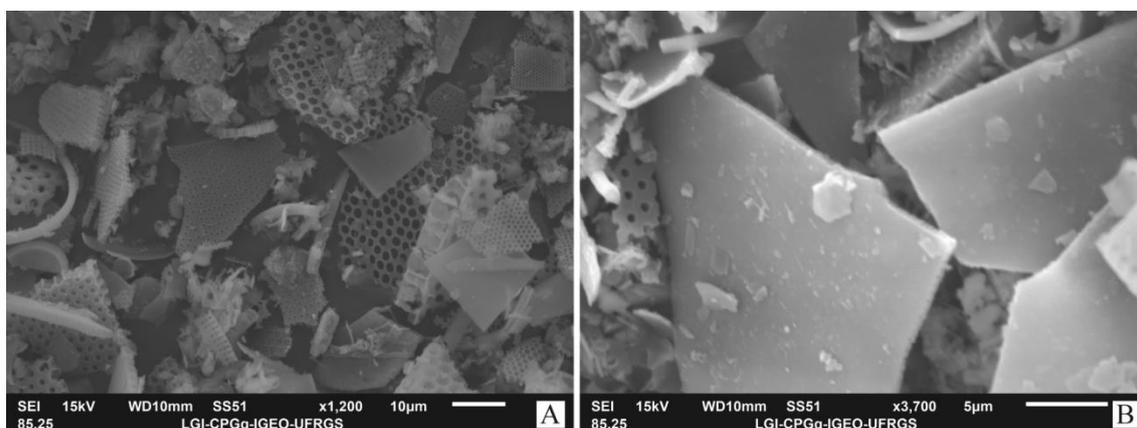


Figura 25 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e fragmentos de diatomáceas placóides (B).

### 4.3 Amostra 23070

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 5A (50%), Classe 2 (40%) e Classe 3 (10%).

#### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração é composta majoritariamente por carapaças de microrganismos, com um componente de cristais de tonalidade bege, branca e preta de menos de 5%. As carapaças apresentam tonalidade bege e representam diversos grupos. Seus tamanhos variam de silte a areia grossa, sendo o tamanho de areia muito fina o mais abundante.

#### *Fração com presença de minerais pesados*

O principal constituinte desta fração são flocos de material muito fino que agem como espécie de matriz, aglutinando grãos. Este material compõe cerca de 50% desta fração. Comumente tem-se carapaças de microrganismos variados e cristais opacos de coloração preta. A granulometria varia de silte a areia média.

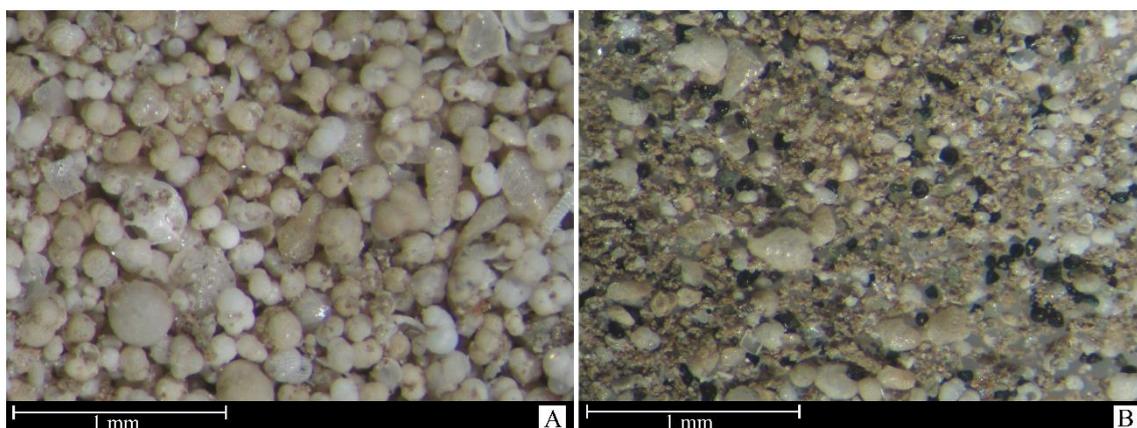


Figura 26 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

#### *Mineralogia*

A fração designada como com presença de minerais pesados foi estudada a partir de difratometria de raios X. A análise em lupa evidencia a presença abundante de materiais calcários, o que é corroborado a partir da interpretação dos difratogramas. Os minerais identificados são quartzo e calcita principalmente (Figura 27 A).

Esta amostra tem como principal constituinte siliciclástico **quartzo**, que ocorre incolor e muito anguloso. Apresenta espécie de “matriz” de granulometria muito fina e

de coloração bege, branca, incolor e preta, com minerais que não puderam ser devidamente qualificados devido ao seu tamanho e disposição espacial. **Albita** também se da presente de forma incolor e com diversas inclusões opacas e aciculares em seu interior.

**Apatita** e **fluorapatita** ocorrem opacas e com graus de esfericidade e arredondamento muito variados. Quanto às micas, tem-se **biotita** amarronada e **muscovita** em tons de cinza e incolor. **Glauconita** (Figura 28 B) também se da presente em tonalidade preta e bem arredondada.

Muitos são os componentes biogênicos na amostra (Figura 28 A), sendo estes os principais constituintes da mesma. Tem-se **espículas de esponjas**, de composição quartzosa e resquílios de **dentes** de composição apatítica. O restante das carapaças e fragmentos biológicos são compostos por calcita e são raramente de **ostracodes** e comumente de **foraminíferos**. Diversos foram os foraminíferos bentônicos identificados, tais como do gênero *Elphidium*, *Uvigerina* e *Bulimina*. Quanto aos plantônicos alguns identificados foram do gênero *Orbulina* e *Neogloboquadrina*. Nanofósseis de cocolitos também foram identificados com tamanhos na ordem de 2  $\mu\text{m}$ .

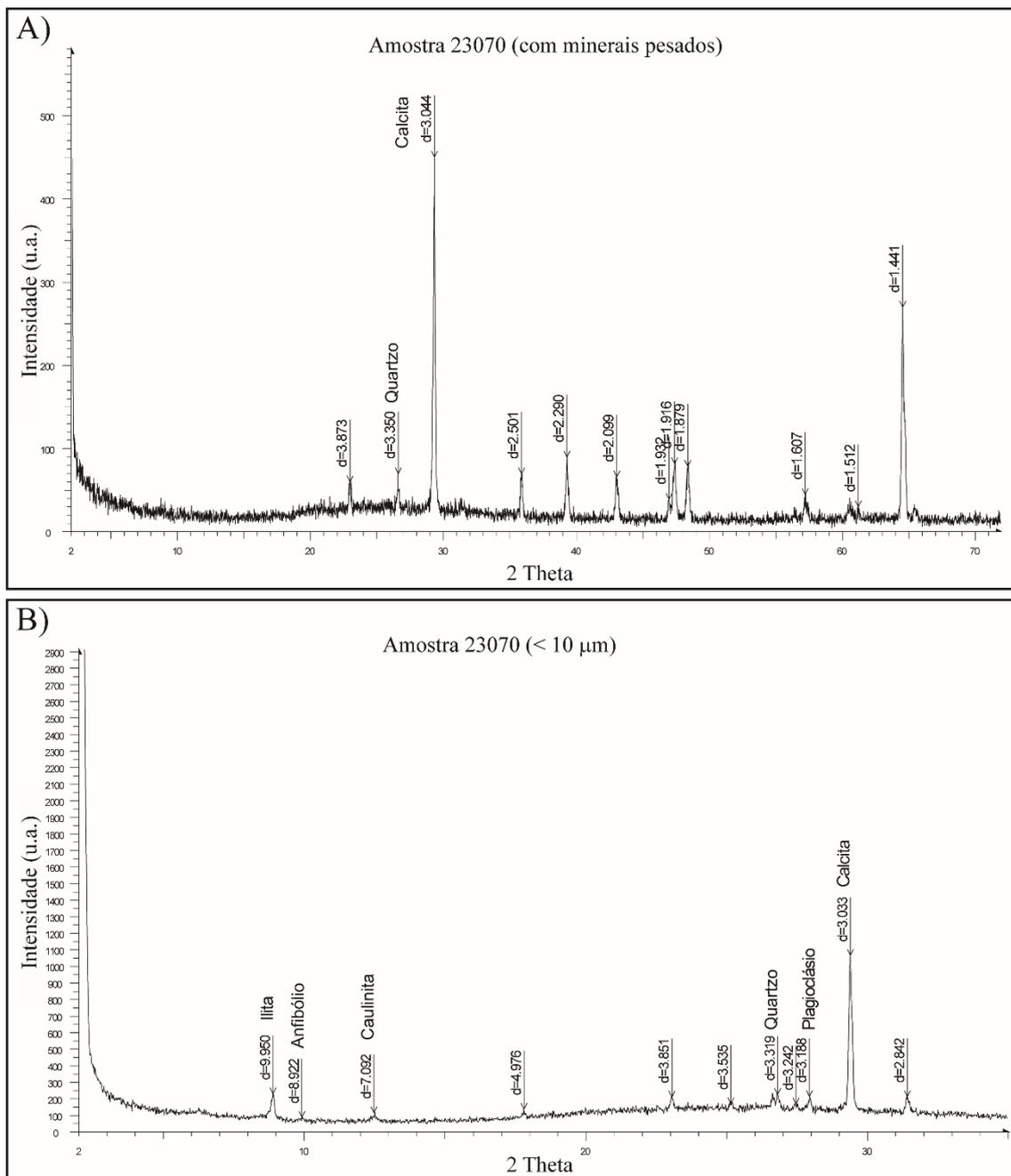


Figura 27 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 μm (B).

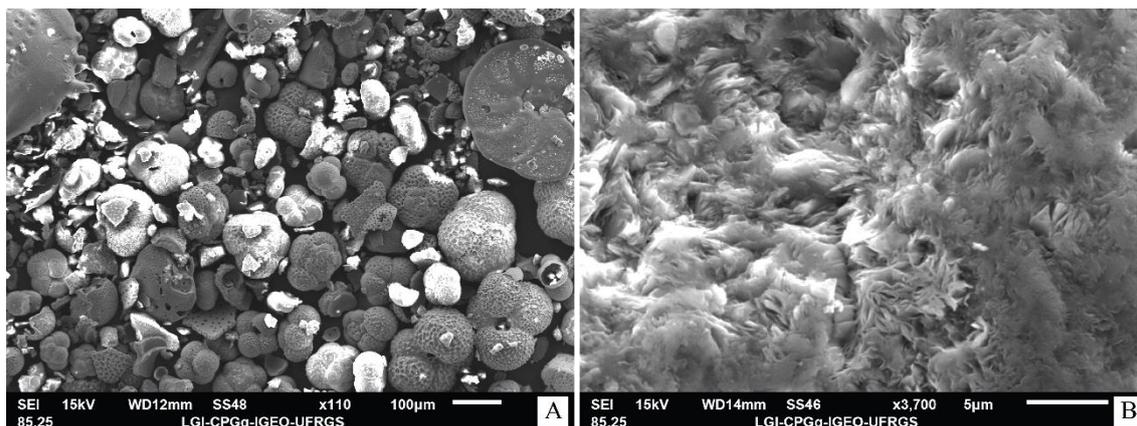


Figura 28 - Aspecto geral da amostra (A) e detalhe de grão de glauconita (B).

#### *Fração inferior a 10 μm*

Diferentemente do material de maior granulometria, a fração mais fina da amostra não apresenta carapaças de foraminíferos, mas sim **cocolitos**. Estes componentes são relativamente abundantes e possuem cerca de 10 μm de tamanho, podendo ocorrer em tamanhos menores também. Algumas **diatomáceas** de cerca de 4 μm estão presentes mais escassamente (Figura 29 A e B).

Quanto às análises por DRX, foram identificados illita, clorita, caulinita, calcita, dolomita, plagioclásio e quartzo. A calcita e dolomita são provenientes dos cocolitos (Figura 27 B).

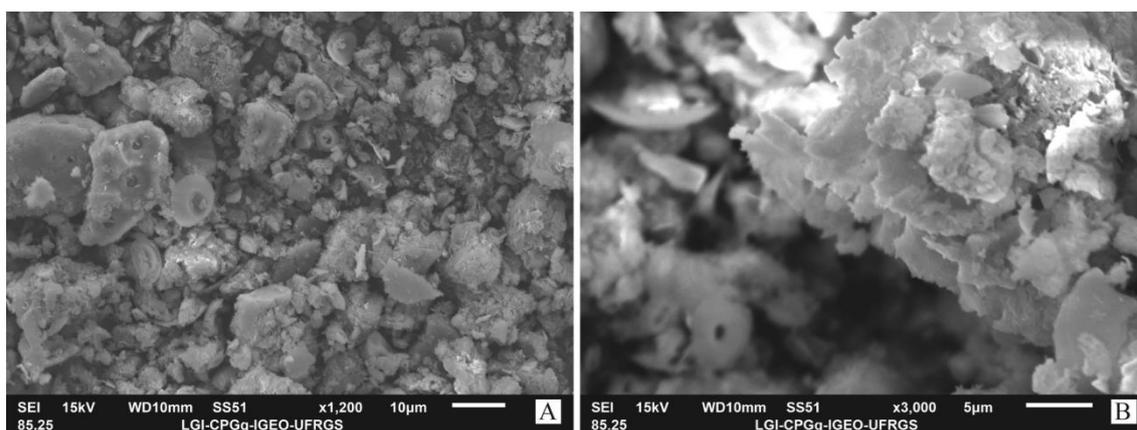


Figura 29 - Aspecto geral da fração inferior a 10 μm (A) e detalhe para forma de ocorrência de argilominerais (B).

#### 4.4 Amostra 26010

A estimativa de proporções modais desta amostra consiste em Classe 1 (80%), Classe 6 (15%) e Classe 7 (5%).

### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta dois tamanhos de grãos proeminentes. Grande parte da amostra é composta por grãos de cerca de 100 a 150  $\mu\text{m}$ , ou seja, limiar entre areia muito fina e fina. Secundariamente têm-se grãos de tamanho areia grossa em menor abundância. Verifica-se que a ampla maioria dos componentes são incolores, já grãos alaranjados e opacos ocorrem raramente.

### *Fração com presença de minerais pesados*

A amostra apresenta grupo de minerais opacos de coloração escura e grupo de minerais incolores e translúcido, ambos compondo cerca de 50% da amostra cada um. Os grãos escuros apresentam-se nas tonalidades de preto, cinza e verde, e geralmente são compostos por grãos moderadamente arredondados. Quanto a fração clara, é composto principalmente por grãos muito angulosos. A granulometria é de areia fina e pouco variável.

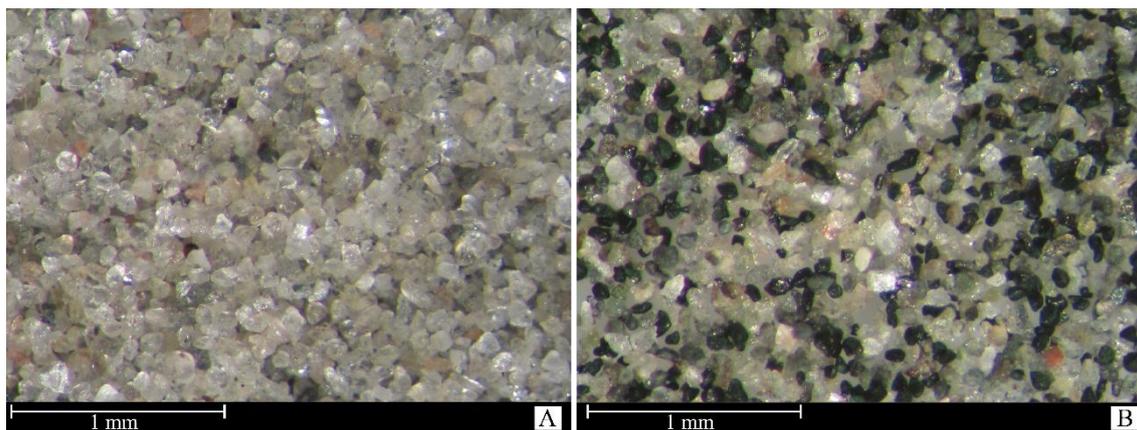


Figura 30 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

### *Mineralogia*

Quando analisada em difratometria de raios x, esta amostra apresenta mineralogia relativamente restrita. Os minerais identificados foram quartzo e feldspatos. Tal fato é apoiado pela análise por lupa, onde se determinou que a grande maioria da amostra era composta por estes dois elementos (Figura 31 A).

Cristais de **quartzo** foram identificados, apresentando tonalidade que varia entre incolor, cinza e laranja. Mais expressivamente tem-se cristais incolores límpidos e com

alta angulosidade. Comumente ocorre com inclusões opacas aciculares em seu interior e em tamanho relativamente maior que o restante da amostra.

Dentre os grupos dos feldspatos, os que ocorrem em maior abundância são **albita**. São cristais que se apresentam tanto incolores quanto em tons acinzentados e translúcidos. De modo geral, são arredondados e apresentam-se levemente esféricos. Como forma de inclusões lamelares em alguns cristais de **Ba-albita** tem-se material composto por enxofre e cálcio, de coloração avermelhada e opaca.

Em menor quantidade tem-se **plagioclásio**. Comumente ocorrem em tonalidade branca, translúcidos e angulosos. Quanto aos **K-feldspatos**, apresentam-se incolores ou opacos em tonalidade branca, geralmente angulosos (Figura 32 A).

Quanto aos filossilicatos, tem-se **muscovita**, incolor e placóide. **Glauconita** ocorre sem hábito variável e de coloração verde escura que se assemelha a preto. Por vezes ocorrem em cavidades de outros grãos (Figura 32 B). **Celadonita** também foi identificada com tonalidade verde e moderadamente esférico, relativamente comum. Com tonalidade que varia entre preto e verde escuro, e geralmente anédricos tem-se **clinopiroxênio** em relativa abundância.

Apresentando proporções relativamente variáveis de fósforo e cálcio, tem-se **apatita** (Figura 32 C), que ocorre em coloração preta e opaca. O arredondamento dos grãos costuma ser alto, exceto pela variedade de **fluorapatita**, que se apresenta angulosa. **Rutilo** foi identificado em menor quantidade e em tonalidades alaranjadas, translúcido e bem arredondado. **Ilmenita** ocorre na sua forma opaca e preta. **Olivina** e **epidoto** ocorrem raramente em tonalidades de verde escuro.

Raramente são identificados grãos cônicos compostos de apatita e com tonalidade cinza e translúcido. Tais cristais são classificados **bioapatitas**, componentes de dentes de organismos marinhos.

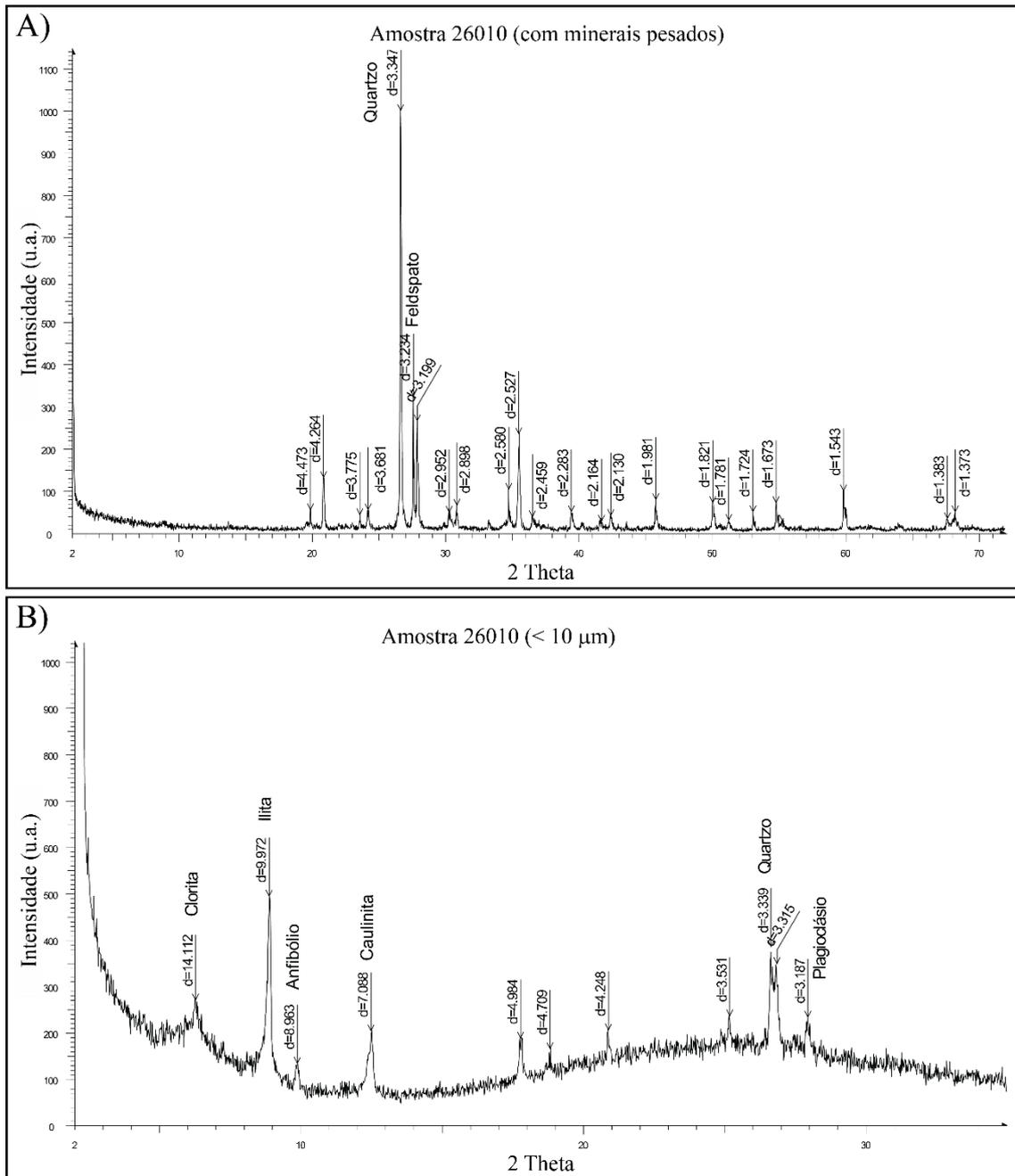


Figura 31 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a  $10 \mu\text{m}$  (B).

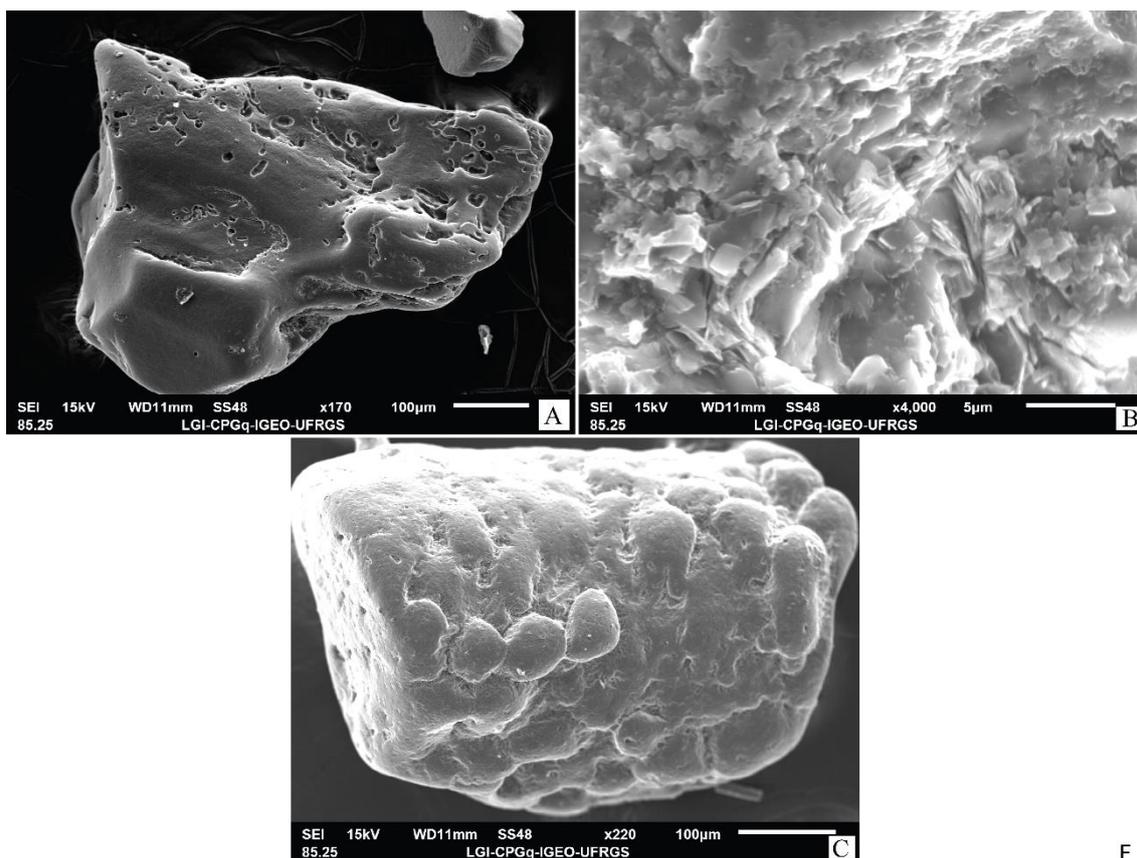


Figura 32 - Grão de feldspato com bioerosão (A), detalhe de argilominerais em cavidade (B) e apatita com hábito distinto (C).

#### *Fração inferior a 10 $\mu$ m*

Esta porção apresenta escassez de materiais de origem biológica, com alguns escassos fragmentos de diatomáceas e de organismos esféricos (Figura 33 B). Comumente as lamelas de argila apresentam-se aglomeradas (Figuras 33 A e C), e em algumas porções é possível identificar cristais placóides com arestas angulosas, correspondente a morfologia de **clorita**.

Quanto ao difratograma gerado, é possível identificar a presença de ilita, clorita, caulinita, plagioclásio, calcita e quartzo. Os materiais de quartzo e plagioclásio estão provavelmente relacionados à presença de materiais de origem biológica (Figura 31 B).

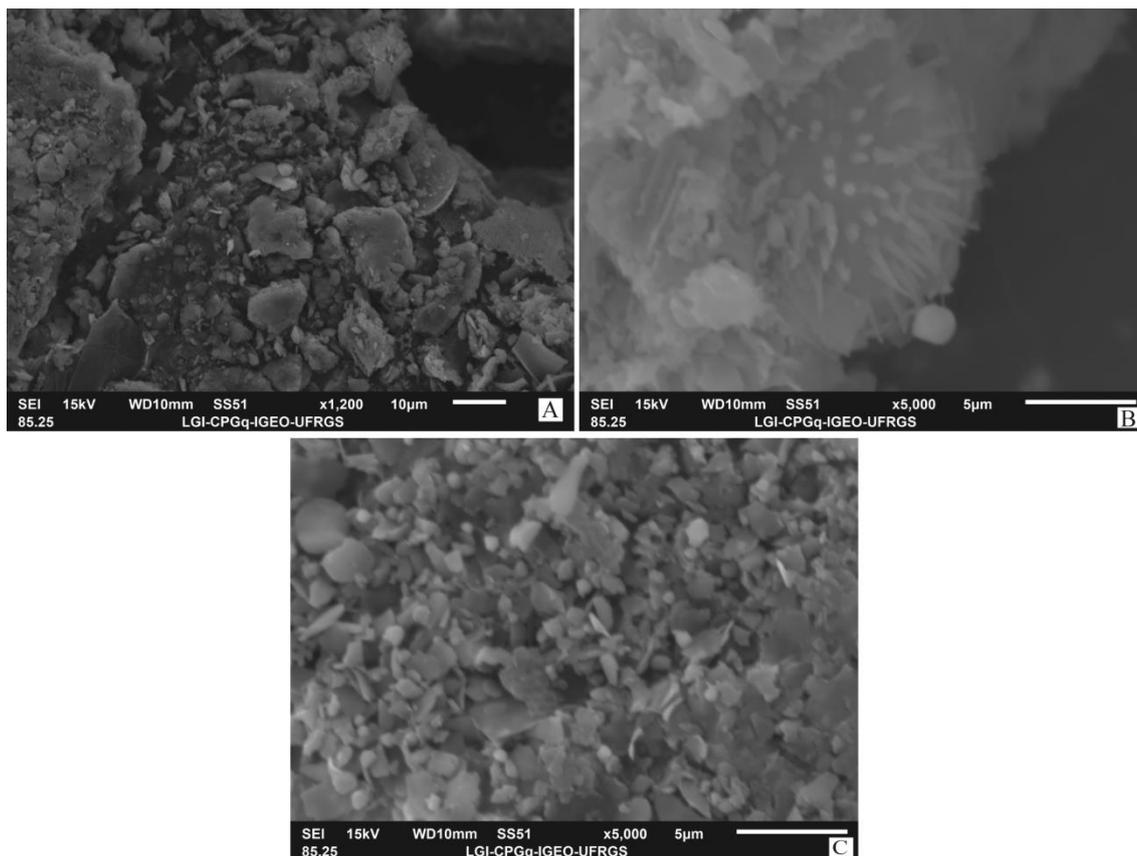


Figura 33 - Aspecto geral da fração inferior a  $10 \mu\text{m}$  (A), microrganismo esférico (B) e cristais de argilominerais (C).

#### 4.5 Amostra 26050

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (40%), Classe 6 (40%) e Classe 7 (10%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta abundância de minerais incolores e angulosos, e também de minerais de tonalidade preta e marrom, que podem ser anédricos, prismáticos ou esféricos. Estes últimos compoem cerca de 30% da amostra. A granulometria média é de areia fina, porém alguns grãos apresentam tamanho areia grossa ou média de forma mais escassa. Nota-se também a grande presença de resquícios dentários de organismos.

##### *Fração com presença de minerais pesados*

Diferentemente da fração sem minerais pesados, esta em questão é composta majoritariamente (cerca de 80%) por cristais escuros. Estes minerais apresentam-se geralmente nas cores preta, verde e marrom, e o grau de arredondamento dos grãos

costuma ser muito alto, assim como a esfericidade. A granulometria é de areia fina, porém, alguns grãos isolados podem chegar a tamanho areia média.

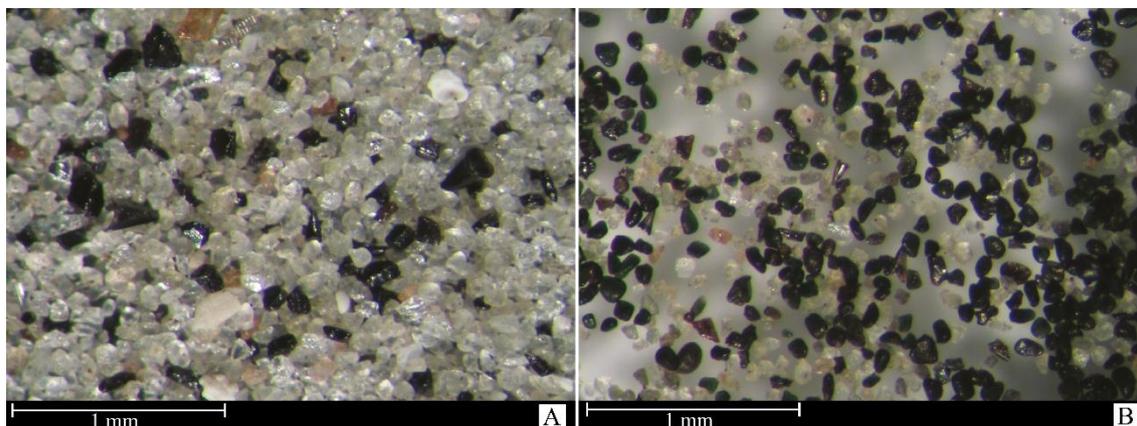


Figura 34 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

### *Mineralogia*

A fração com presença de minerais pesados foi analisada por difratometria de raios X e evidenciou a presença de quartzo, feldspatos, calcita e apatita (Figura 35 A). Neste caso a apatita apresenta-se no difratograma pois apresenta cristalinidade relativamente boa.

Grãos de **quartzo** e **k-feldspato** foram identificados geralmente anédricos, com diafanidade variante entre transparente e translúcido, geralmente incolores à esbranquiçados. Opacos e de tonalidade esbranquiçada e amarelada tem-se **calcita**, comumente angulosa. Por vezes são encontrados grãos arredondados recobertos por óxido de ferro, conferindo assim tom alaranjado aos cristais.

Como um dos componentes mais abundantes da amostra, tem-se **apatita**, que ocorre com variabilidade de cor e hábito. Aqueles compostos somente por fósforo e cálcio apresentam-se em tonalidade preta e opacos, muito angulosos. Já as demais variedades são consideradas **fluorapatita**, visto a presença de teores entre 5.49% e 2.11% de flúor. Muitas vezes ocorrem esféricas (Figura 36 B). É possível verificar grande variedade quanto ao hábito destes cristais, geralmente anédricos, e também variedade de cor, podendo ser laranja, marrom ou preto. **Bioapatita** se da presente em fragmentos de dentes de organismos marinhos (Figura 36 A).

Relativamente abundante tem-se **clinoanfíbólio**, em tonalidade esverdeada, translúcido e anédrico. Em cor cinza avermelhado, translúcido e com hábito prismático tem-se **turmalina**. Com coloração cinza e brilho metálico tem-se material composto por enxofre e ferro, muito provavelmente **pirita**.

Quanto aos componentes de origem biológica, tem-se fragmentos de **foraminíferos** e indícios de **bioerosão** em alguns grãos de calcita.

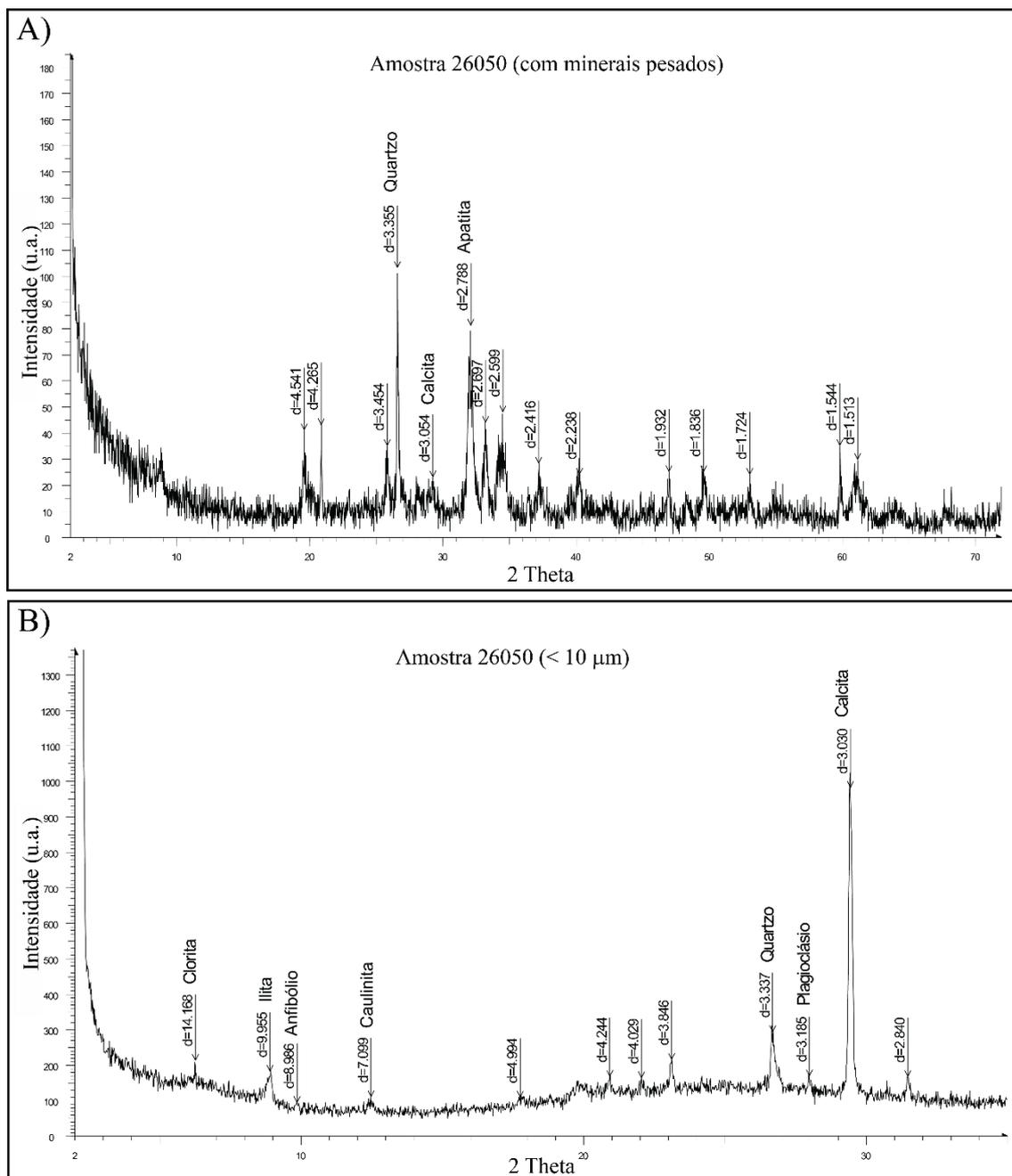


Figura 35 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

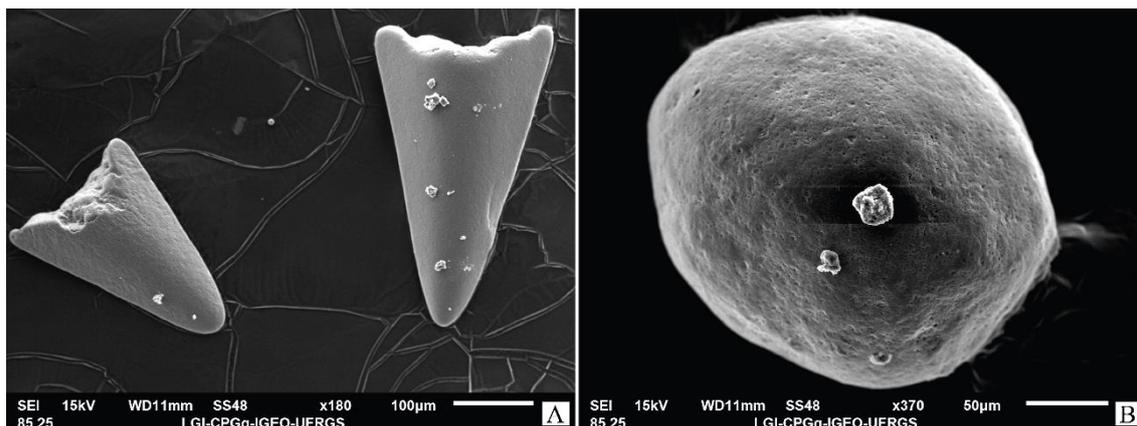


Figura 36 - Fragmentos de dentes de organismos marinhos (A) e grão esférico de apatita (B).

#### Fração inferior a 10 µm

Este material apresenta pouca quantidade materiais biológicos (Figura 37 A), sendo os presentes os **cocolitos** (Figura 37 B) e **diatomáceas**. Os argilominerais apresentam-se agregados e sem hábito muito bem definido.

As análises por DRX evidenciaram a presença de clorita, ilita, caulinita, quartzo, calcita e dolomita, sendo os três últimos minerais constituintes de carapaças e fragmentos de microrganismos (Figura 35 B).

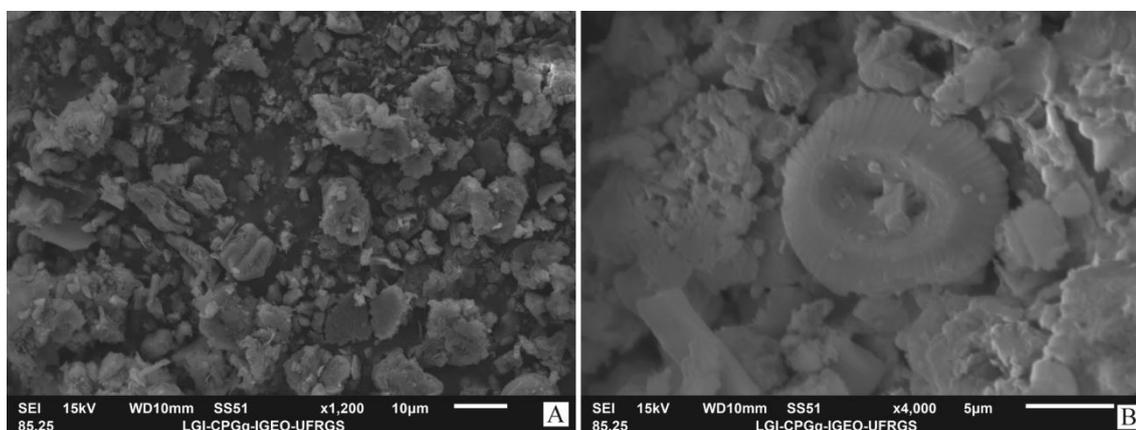


Figura 37 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e cocolitos (B).

#### 4.6 Amostra LAG

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (60%), Classe 2 (20%), Classe 6 (10%) e Classe 4 (10%).

*Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta variação granulométrica muito expressiva, partindo de silte até areia fina, com salvas exceções pontuais que excedem este tamanho. Assim como a variabilidade de tamanho existe grande variabilidade de forma, tendo grãos bem arredondados, outros bem angulosos, sem formato preferível para cada tamanho de grão. A maior parte do material é constituída por cristais incolores e por vezes translúcidos, porém com ausência de quantidades expressivas de minerais opacos.

*Fração com presença de minerais pesados*

Os constituintes desta fração apresentam-se comumente aglomerados em flocos que possuem tamanho muito variado. Estes flocos ocorrem em diversos tamanhos, desde areia média até silte, e são compostos por grãos de tamanho maior que silte e argilominerais que agem como aderentes dos materiais. A maior parte dos grãos individualizados na amostra não ultrapassa o tamanho de areia muito fina, porém não é possível identificar tamanho modal, visto a grande variabilidade e distribuição granulométrica da amostra. Os cristais são comumente bege, incolores, esbranquiçados e pretos.

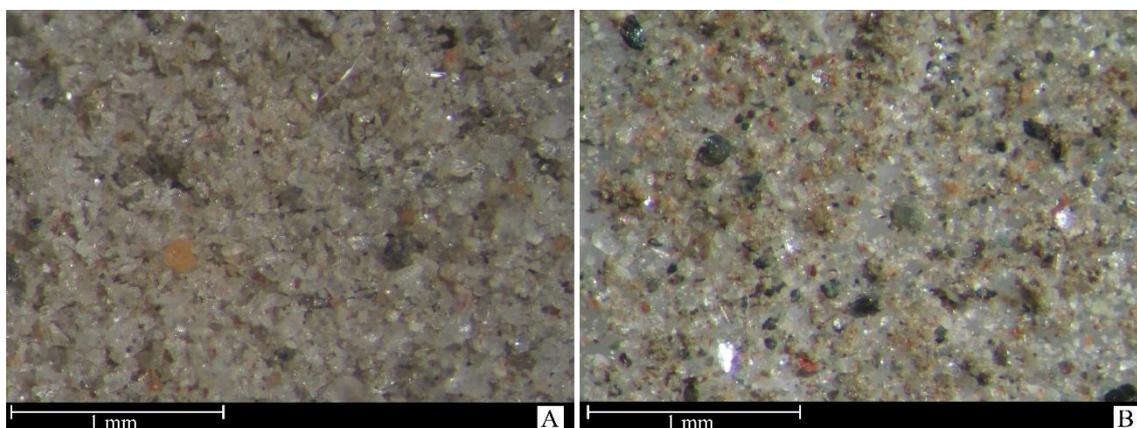


Figura 38 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

*Mineralogia*

Diferentemente das amostras já descritas, esta fração da amostra apresenta grande variedade composicional. Tal fato é verificado pela presença de clorita, micas, anfibólio, piroxênio, caulinita, quartzo, feldspatos e calcita (Figura 39 A) nesta amostra,

através de análise por difratometria de raios X. Tal variedade também é verificada em análise macroscópica por lupa.

Nesta amostra, diversos são os constituintes apresentam as mesmas características físicas, principalmente no que diz respeito aos grãos de quartzo e feldspatos. Com as propriedades de alta angulosidade, limpidez e incolores têm-se **quartzo** e **plagioclásio** (Figura 40 A). Os cristais com estas mesmas características, porém com a presença de inclusões pretas aciculares são de quartzo, **albita** e **k-feldspato**. **Anortita** ocorre similar a estes materiais, exceto pela presença de inclusões alaranjadas e não pretas. Raramente são encontrados grãos arredondados e de maior tamanho de quartzo translúcido e cinza escuro, por vezes quase preto.

Apresentando coloração preta e opaca tem-se **fluorapatita**, com tamanho inferior à moda da amostra. Óxidos de ferro, provavelmente **magnetita** também apresentam essas características, exceto pelo fato de mostrarem brilho avermelhado. Com tonalidade cinza e de grande tamanho tem-se **epidoto**. **Ilmenita** ocorre anédrica e em tonalidade preta raramente.

**Biotita** ocorre em espécies incolores e amarronadas. Placóide e de coloração branca tem-se **rutilo**. **Clinopiroxênio** (Figura 40 B) apresenta-se verde e com hábito que varia entre prismático e placóide, enquanto que os **clinoanfíbólios** costumam ocorrer pretos.

Componentes biogênicos também foram identificados, sendo todos de composição quartzosa. São **diatomáceas** e **espículas de esponjas**, sendo estes últimos os mais frequentes.

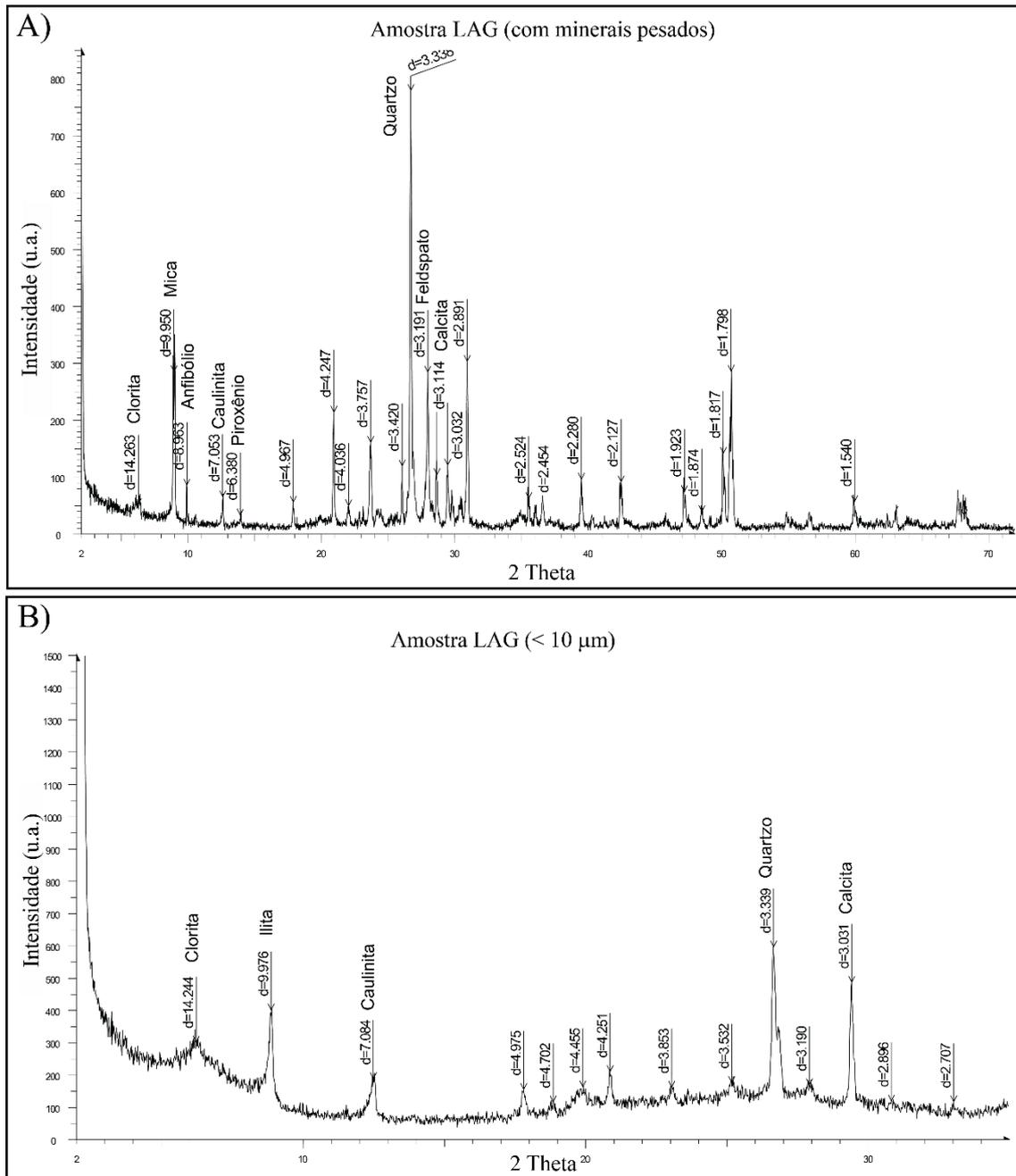


Figura 39 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

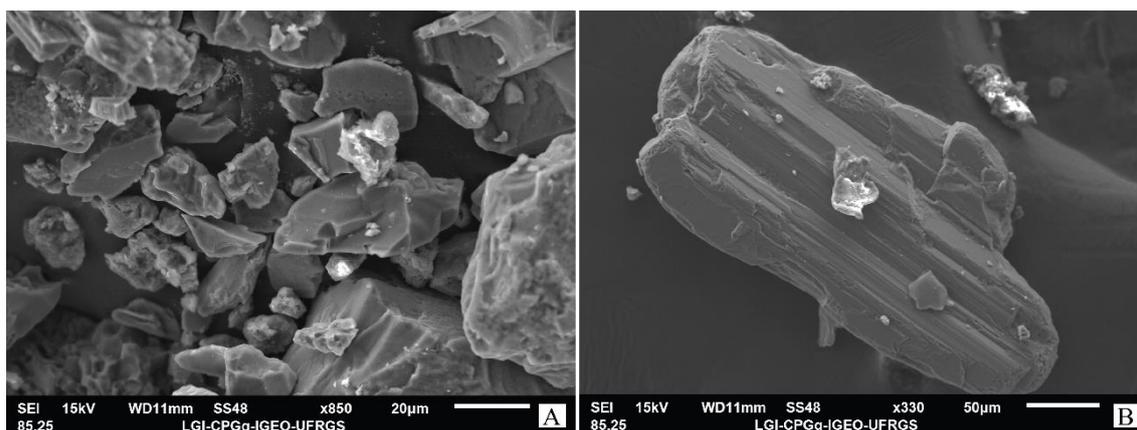


Figura 40 - Grãos angulosos (A) e piroxênio (B).

*Fração inferior a 10 µm*

Análises em MEV evidenciam a presença escassa de fragmentos de diatomáceas, que apresentam tamanho de orifícios variáveis. Quanto aos argilominerais, apresentam-se aglomerados e de hábito irregular (Figura 41).

Os resultados de DRX demonstram a presença de illita, clorita, quartzo, calcita e dolomita (Figura 39 B).

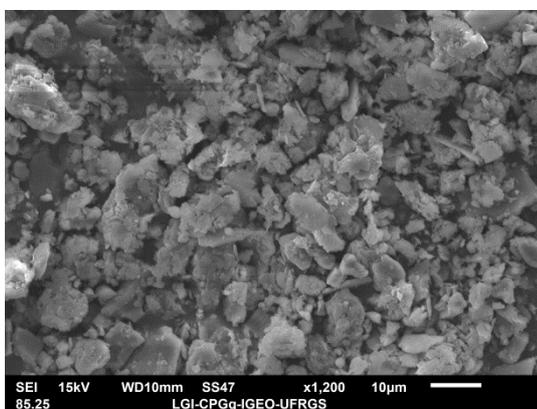


Figura 41 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm .

#### 4.7 Amostra LUDHC

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (85%), e Classe 7 (15%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta variação granulométrica que varia de silte a areia fina. O material é composto majoritariamente por cristais incolores e translúcidos de tonalidade esbranquiçada, e raramente cristais alaranjados. Alguns fragmentos de espículas de esponja apresentam tamanho areia média, mas são relativamente escassos.

##### *Fração com presença de minerais pesados*

Esta fração apresenta variabilidade de componentes, contendo minerais incolores e opacos pretos em abundância. Em menor quantidade tem-se cristais vermelhos e laranjas. Apresenta pouca variabilidade de granulometria, entre areia média e silte.

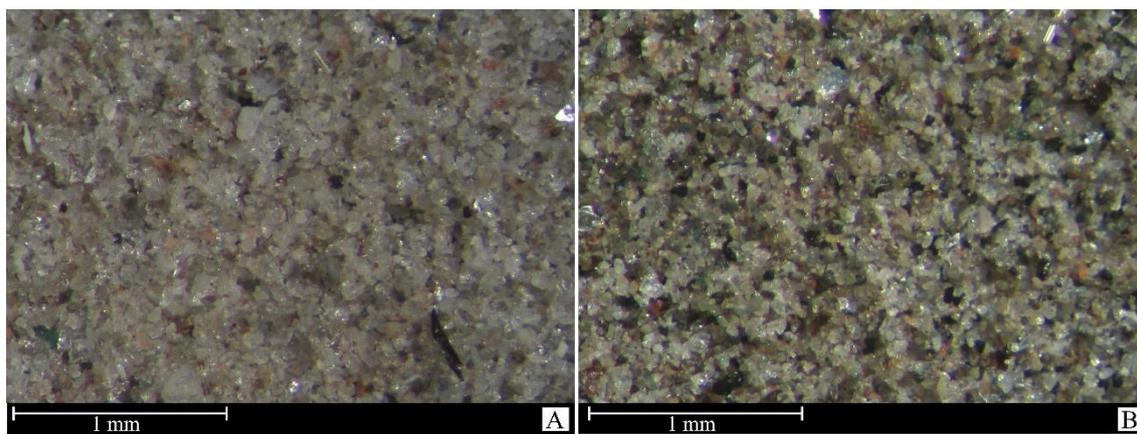


Figura 42 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

##### *Mineralogia*

Esta amostra foi caracterizada em sua totalidade da fração superior a 10 micra pelo método de difratometria de raios X. Tal análise proveu informações de que se tem micas, anfibólios, quartzo, feldspatos e calcita (Figura 43 A) como componentes majoritários da amostra.

Como principal constituinte desta amostra, o **quartzo** apresenta-se incolor e com grande angulosidade. Similarmente tem-se **plagioclásio**, que apresenta inclusões pretas

aciculares no interior dos seus grãos porém é mais arredondado que o quartzo. Pode ocorrer tanto em variedades incolores quanto acinzentadas. Com diafanidade translúcida porém também incolores tem-se grãos de **k-feldspato**.

Quanto aos filossilicatos, tem-se **muscovita**, que ocorre de forma incolor, e **biotita**, com variedades acinzentadas e amarronadas. Quanto à **glauconita**, apresenta de tamanho inferior à moda da amostra e tonalidade que varia entre preto e verde escuro.

Alguns minerais de coloração distinta foram identificados, como é o caso da **albita**, que ocorre em tons alaranjados e esverdeados, e da **actinolita**, esverdeada, e de **óxidos de ferro**, alaranjados. Com exceção da actinolita, que apresenta-se prismática, os demais minerais são anédricos e opacos.

Diversos componentes opacos e de coloração preta foram identificados, mas as análises por EDS não foram eficientes o suficiente. Portanto, o que pode-se dizer a respeito destes materiais é que são compostos em parte por enxofre, alguns apresentando alumínio ou cálcio como constituintes secundários. Estes materiais costumam apresentar cavidades ou estrias em suas superfícies e por vezes apresentam-se relativamente maleáveis, o que pode indicar sua origem biogênica.

Alguns materiais de origem biogênica foram identificados, como **escamas** de tonalidade amarronada e **tubos** de composição silicática.

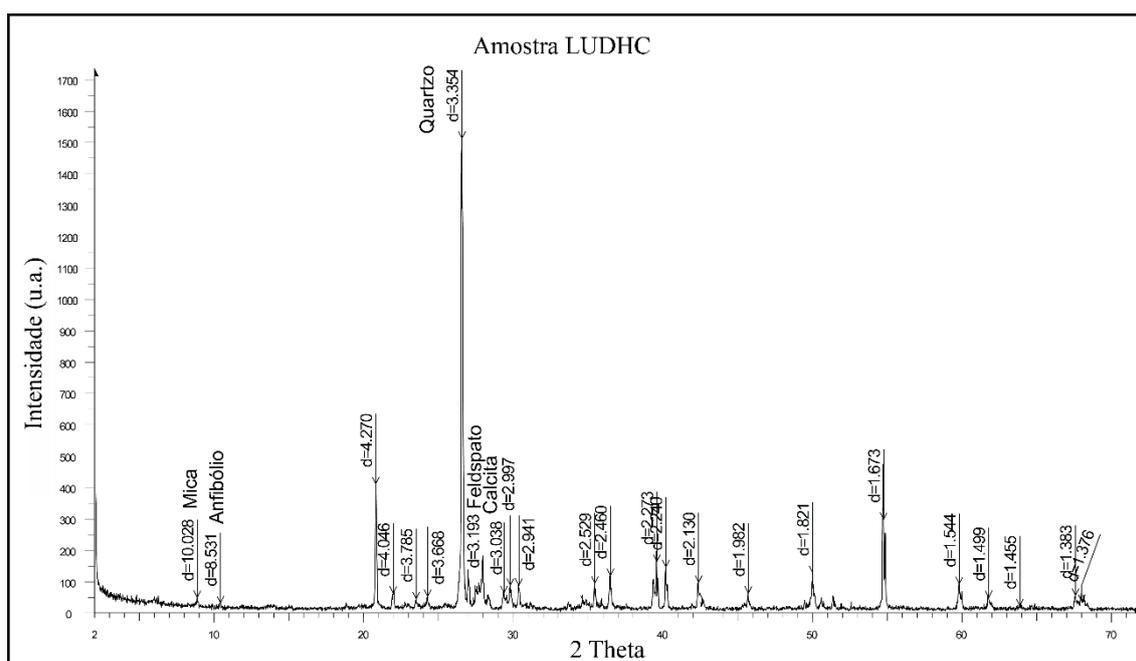


Figura 43 - Difratograma da amostra.

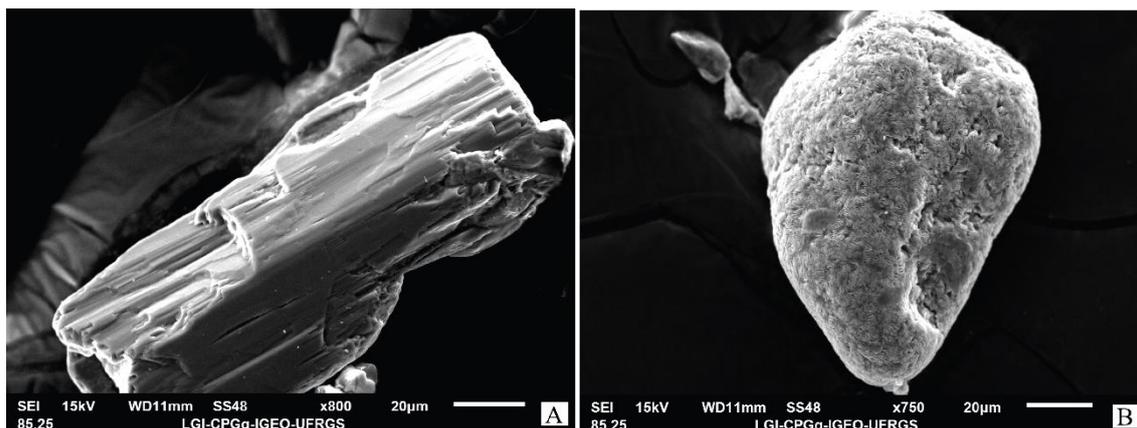


Figura 44 - Grão prismático de anfibólio (A) e de glauconita (B).

#### *Fração inferior a 10 µm*

Esta amostra, ao ser fracionada, não apresentou quantidade suficiente de material inferior a 10 µm para posterior análise.

#### 4.8 Amostra LUDH

A estimativa de proporções desta amostra consiste em 90% Classe 1, 5% Classe 3 e 5% Classe 7.

#### *Fração mista*

Esta amostra apresenta grande variedade mineralógica, com abundância de minerais incolores e acinzentados translúcidos. Comumente tem-se minerais alaranjados e mais raramente opacos, geralmente restritos a fração mais fina. Quanto a granulometria, apresenta-se muito variada, entre silte e areia grossa. Os cristais de maior tamanho costumam apresentar-se muito arredondados e moderadamente esféricos.

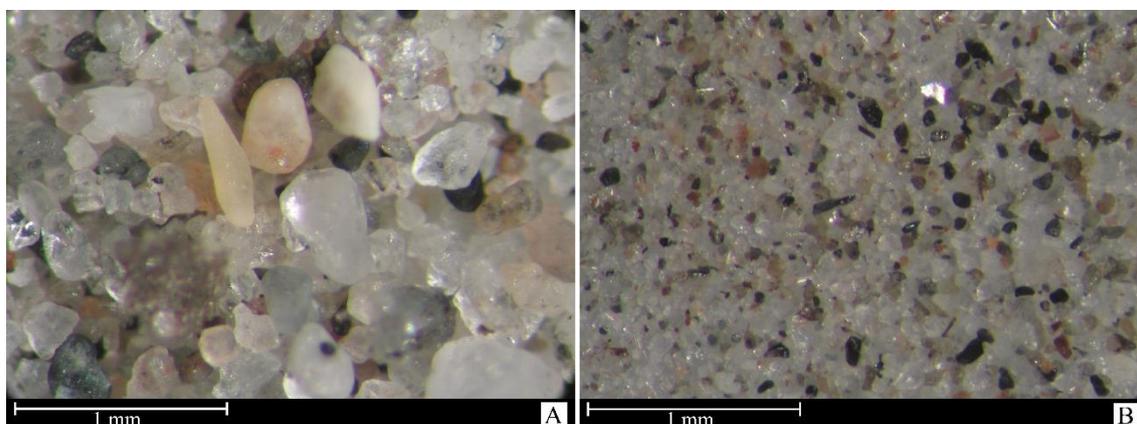


Figura 45 - Fração de tamanho superior a 60 µm (A) e inferior (B).

### *Mineralogia*

Ao ser analisada por difratometria de raios X, a fração com predominância de minerais pesados apresentou como constituintes majoritários alguns minerais. São eles illita, piroxênios, quartzo, feldspatos e calcita (Figura 46 A). Essa última estando diretamente relacionada à presença de carapaças de microrganismos em meio ao sedimento.

Esta amostra apresenta grãos de **quartzo** angulosos e que podem-se apresentar incolores, translúcidos acinzentados e até mesmo pretos. Quanto aos **k-feldspatos**, apresentam-se incolores porém com grau de arredondamento maior quando comparado aos grãos de quartzo.

Opacos, anédricos e de arredondamento variável tem-se grãos de **apatita** (Figura 47 A) e de **fluorapatita**, relativamente comuns na amostra. Podem ser pretos ou amarronados. Os demais minerais opacos de tonalidade preta e por vezes prismáticos são **clinopiroxênios** e **anfíbólios** (actinolita e Fe-hornblenda). Apresentando tonalidade esverdeada tem-se **anfíbólio**, **clorita** e **epidoto**. Este último ocorrendo como prisma curto de arestas abaoladas e em tonalidade oliva. Zircões ocorrem inclusos em alguns grãos de apatita (Figura 47 B).

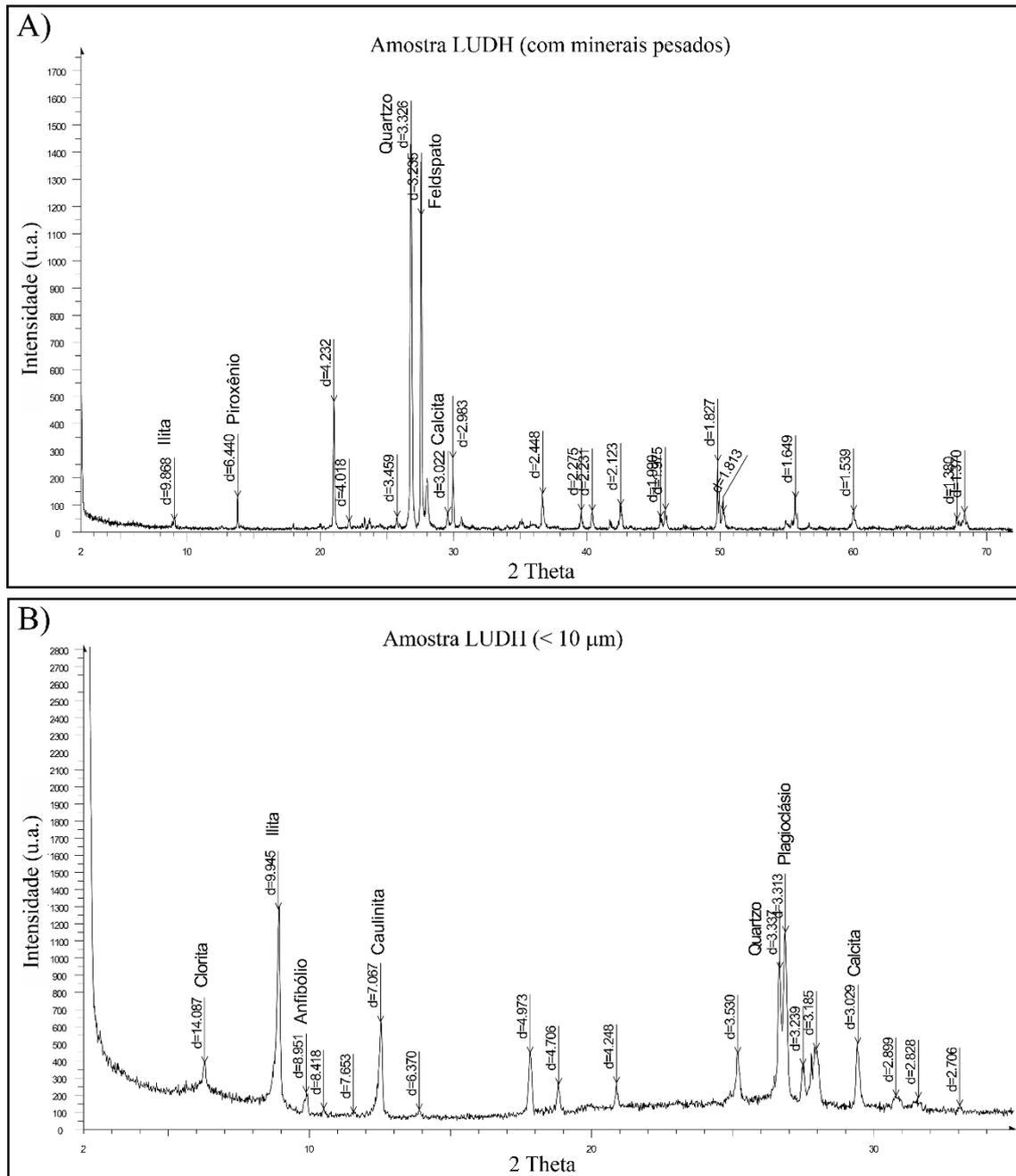


Figura 46 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

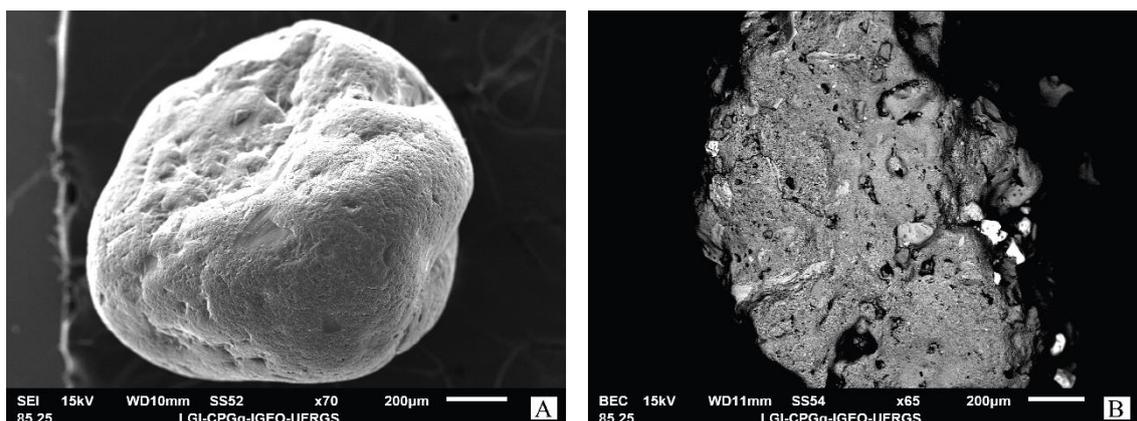


Figura 47 - Grão esférico de apatita (A) e apatita com inclusões de zircão (B).

*Fração inferior a 10 µm*

Ao ser imageada em MEV foi possível perceber a presença de placas de minerais micáceos e ausência de componentes biológicos. Ao ser analisada pela técnica de difratometria de raios X, esta fração da amostra apresentou os minerais clorita, illita, caulinita, plagioclásio, quartzo e calcita (Figura 46 B).

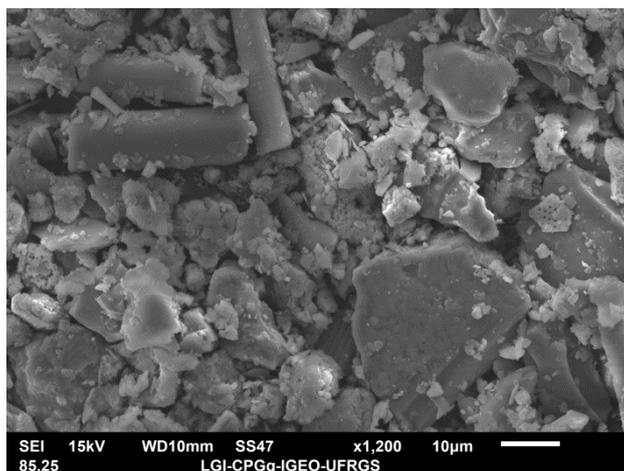


Figura 48 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm.

#### 4.9 Amostra SWB

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (85%), Classe 6 (10%) e Classe 7 (5%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta abundância de fragmentos de conchas e de minerais incolores. A maior parte do material encontra-se em tamanho entre areia muito fina e areia média, enquanto que os fragmentos costumam apresentar-se em tamanho areia grossa.

##### *Fração com presença de minerais pesados*

Dentre a grande variabilidade mineral desta amostra, percebe-se que ocorrem em abundância minerais incolores e acinzentados. Grãos de tonalidade laranja também são muito comuns, assim com opacos e acinzentados. A granulometria predominante é de tamanho areia fina e os extremos, em bem menor quantidade, são areia média e areia muito fina.

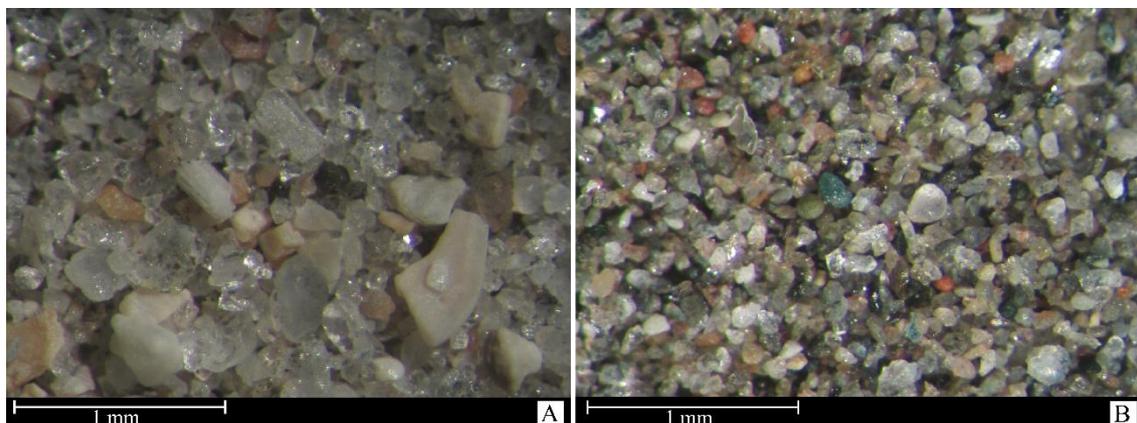


Figura 49 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

##### *Mineralogia*

A análise por difratometria de raios X da fração com presença de minerais pesados evidenciou diversas espécies minerais. Entre elas, se tem micas, caulinita, quartzo, calcita e feldspatos (Figura 50 A).

**Quartzo** ocorre como um dos principais constituintes da amostra e apresenta quatro formas de ocorrência distintas. Tem-se em variedade incolor, translúcido

esbranquiçado e opaco em tom cinza. Cristais alaranjados foram identificados e classificados como **citrino** devido à sua tonalidade.

Existe grande ocorrência de minerais do grupo dos feldspatos, como é o caso de variedades de **plagioclásio**, que apresentam-se incolores com tonalidade bege ou laranja. Os grãos costumam apresentar inclusões pretas e vermelhas aciculares. **Albita** foi identificada com característica singular, ocorrendo em variedade opaca e de coloração preta, sempre apresentando tamanhos de grão muito maiores à moda da amostra. Quanto aos cristais de **k-feldspato**, apresentam-se incolores e com presença de inclusões pretas e aciculares em seu interior. Raramente identificou-se grãos de **amazonita**, que apresenta tonalidade azul distinta.

Em menores quantidades tem-se **muscovita**, **biotita** e **glauconita**, com tamanho de cristal inferior à moda da amostra e com tonalidade verde escuro. Por vezes recobrem grãos e outros minerais (Figura 51 B). **Epidoto** apresenta tonalidade laranja, **turmalina** apresenta-se prismática, opaca e de cor preta e **piropo** ocorre translúcida e esverdeada. **Fluorapatita** é relativamente comum, podendo apresentar-se placóide e marrom ou preta e opaca, por vezes anédrica, por vezes quase esférica. Também foram identificados **titanita**, de tonalidade alaranjada, **ilmenita**, preta, **Fe-anfibólio** prismático e preto (Figura 51 A), e **clinopiroxênio** (Figura 23 C).

A presença abundante de fragmentos de **conchas**, de composição de calcita, faz com que esta seja uma característica distintiva em relação às demais amostras observadas. Os fragmentos apresentam grande variabilidade de tamanho e cor, como bege, lilás, branco e marrom. Alguns **foraminíferos** bentônicos também foram identificados em menor quantidade, assim como espinhos de **equinóides** já corroído.

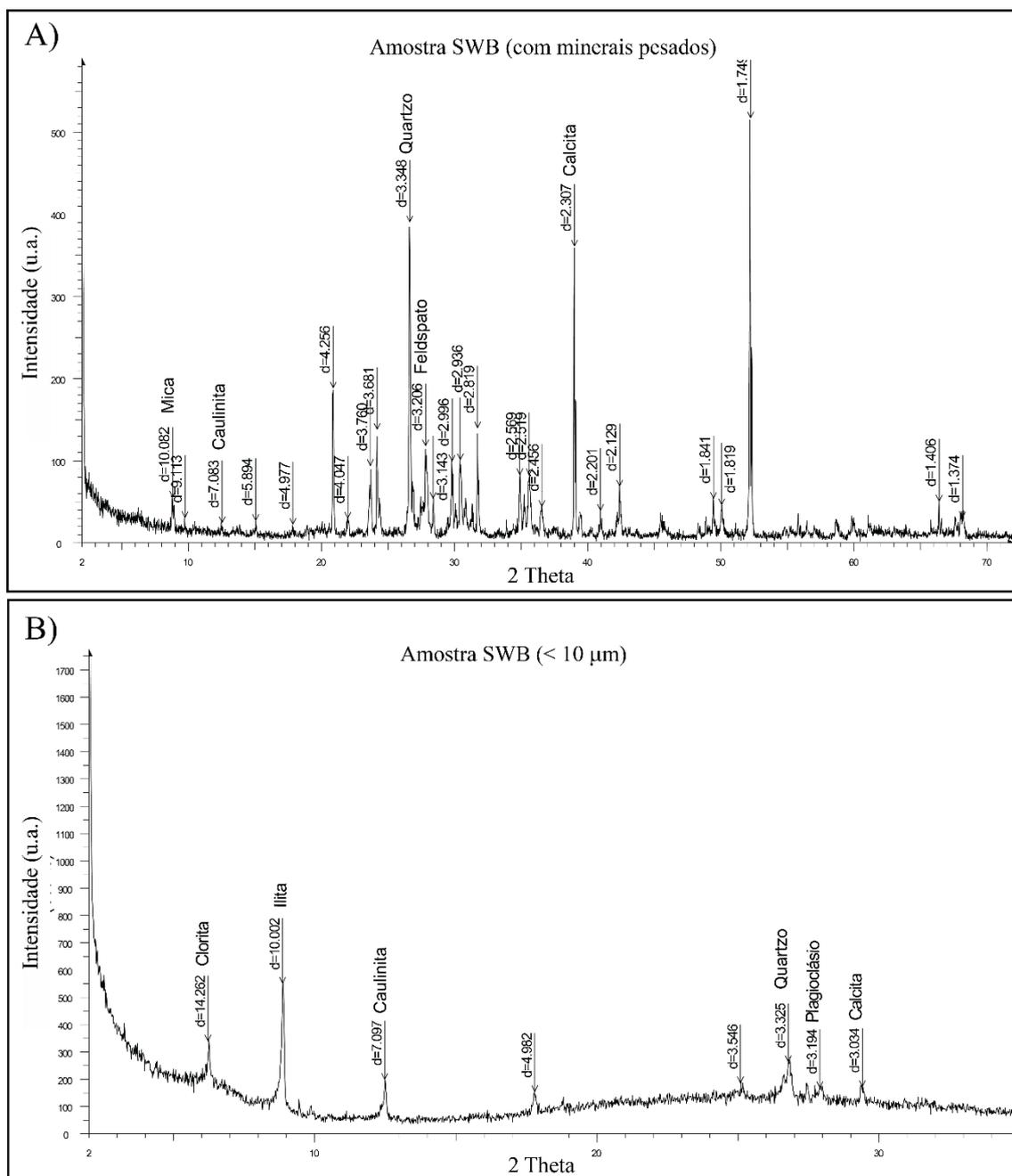


Figura 50 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 μm (B).

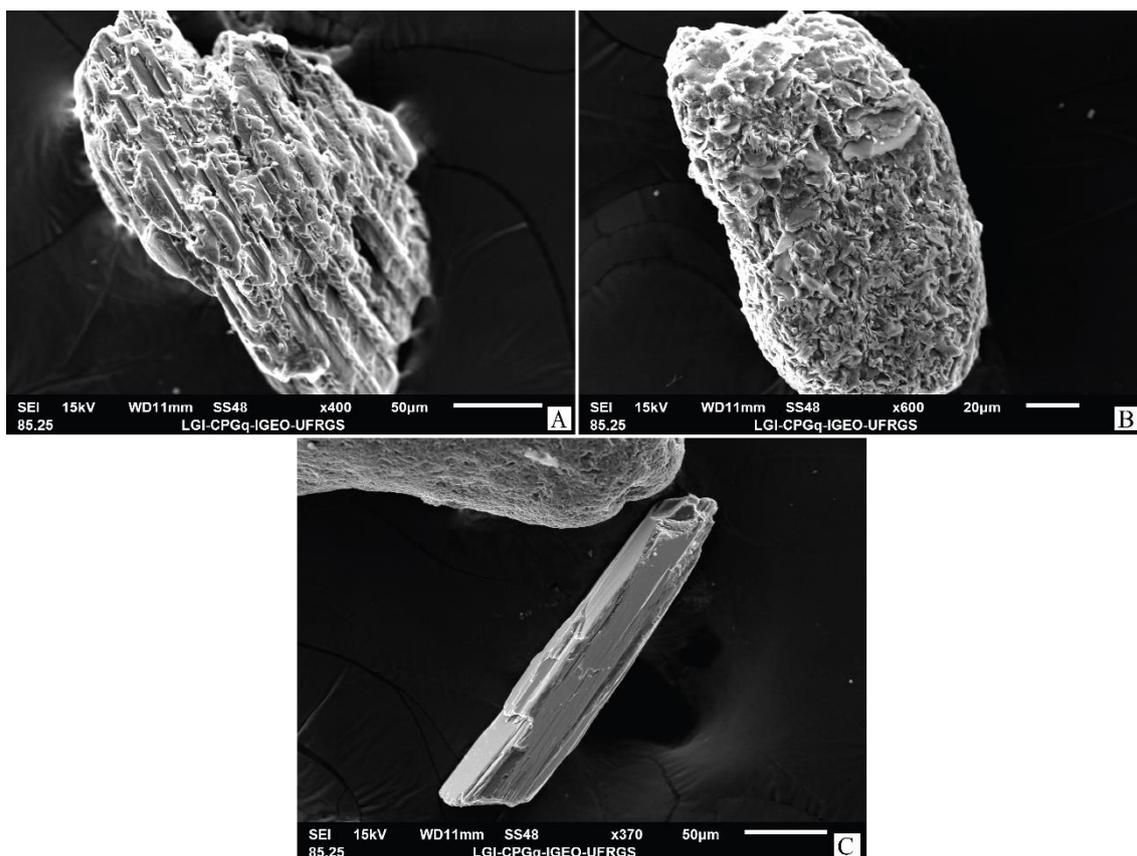


Figura 51 - Grão de anfibólio (A), grão de feldspato recoberto por minerais micáceos (B) e grão prismático de piroxênio (C).

*Fração inferior a 10 µm*

Quando observada em MEV, esta fração apresenta tanto cristais de cerca de 10 µm quanto conjunto de argilas aderidas de tamanhos variáveis. Resquícios de **conchas** são foram identificados (Figuras 52 A e B).

O difratograma apresentou picos referentes a clorita, illita, caulinita, calcita, plagioclásio e quartzo (Figura 50 B).

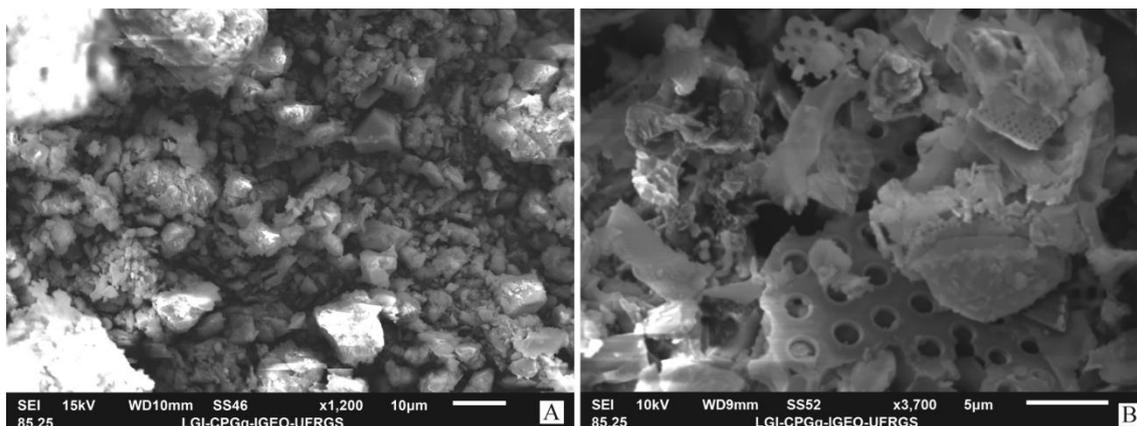


Figura 52 - Aspecto geral da fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (A) e visão de detalhe dos fragmentos de diatomáceas (B).

#### 4.10 Amostra WBH

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (40%), Classe 6 (25%) e Classe 4 (25%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta frequentes fragmentos de escamas, material translúcido e foliar com ranhuras em sua superfície. Abundantemente tem-se cristais incolores moderadamente arredondados e alguns escassos opacos. A granulometria é bem variada, iniciando em silte e chegando até areia média na fração mineral. Já os fragmentos escamosos chegam até tamanho areia grossa (Figura 53 A).

##### *Fração com presença de minerais peados*

Diferentemente da porção separada do material, esta fração apresenta abundância de flocos de até 300  $\mu\text{m}$  com minerais de tonalidade bege (Figura 53 B). Algumas escamas são identificadas, assim como opacos, porém são raros. A granulometria dos grãos individualizados varia de areia fina à argila, sendo esta última presente principalmente nos agregados, agindo como “cimento” de materiais mais grossos.

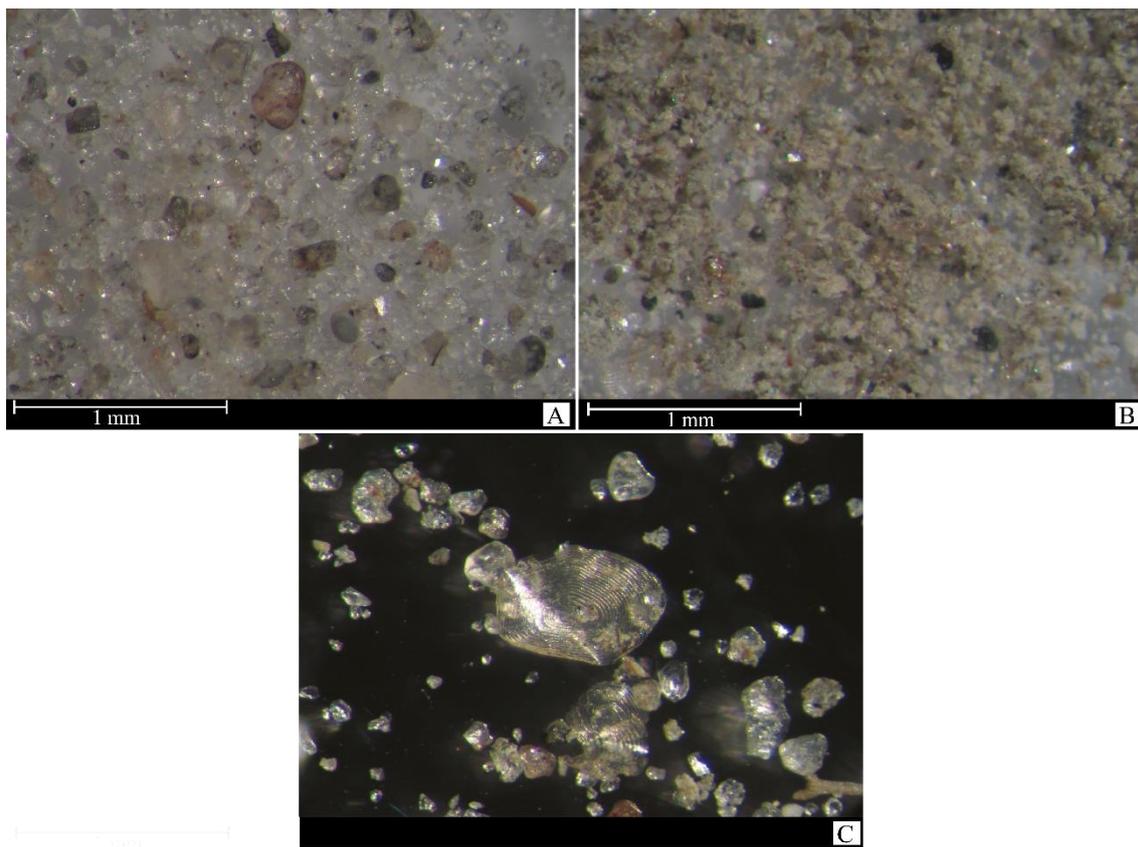


Figura 53 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. Fragmento de escama em aumento de 100 x (C).

### *Mineralogia*

Esta amostra foi analisada em sua totalidade de fração superior a 10 micra pelo método de difratometria de raios X. Foi possível identificar a presença de micas, quartzo e feldspatos como componentes majoritários da amostra (Figura 54 A).

Como principal constituinte da amostra tem-se **quartzo**, que ocorre de forma incolor, e por vezes apresenta inclusões aciculares de coloração preta ou laranja. Por vezes ocorre em tonalidade esbranquiçada e translúcido. Mais raramente encontra-se em tonalidade preta e opaca, provavelmente microcristalino.

**Albita** também possui similaridade com o quartzo, visto a presença de inclusões em seu interior. Destaca-se que a única forma de diferenciar estes dois componentes de forma microscópica é a partir da diafaneidade, que é translúcida para albita e transparente para o quartzo. Existe também variedade de albita opaca e acinzentada comumente. **K-feldspato** ocorre por vezes em tonalidade esbranquiçada e translúcida, e por vezes preto e opaco, de maior tamanho. Cristais de **muscovita** são raros e

apresentam-se incolores. Raramente tem-se cristais opacos de tonalidade preta de **apatita**, geralmente anédrica e arredondada, **clinopiroxenos** e **clinoanfíbolios**, por vezes prismáticos.

Fragmentos de **escamas** foram identificadas (Figuras 53 C e 55), apresentando-se em tonalidades de bege e castanho, sempre translúcidos e com evidente estriamento superficial. Suas composições consiste em cálcio e fósforo.

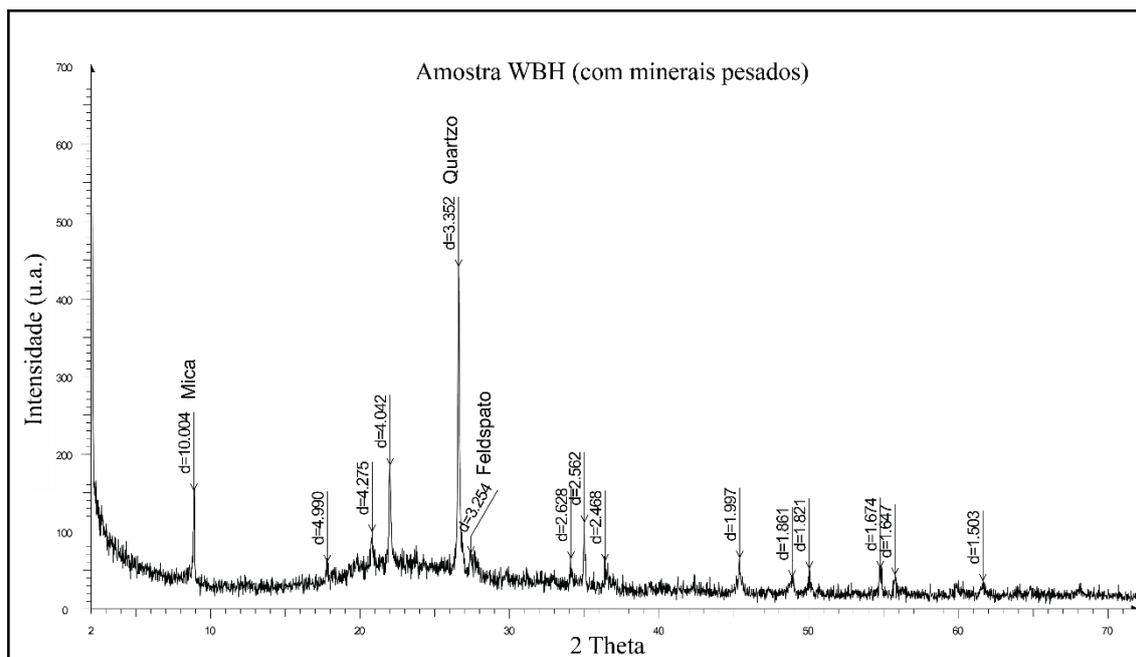


Figura 54 - Difratograma da fração com presença de minerais pesados.

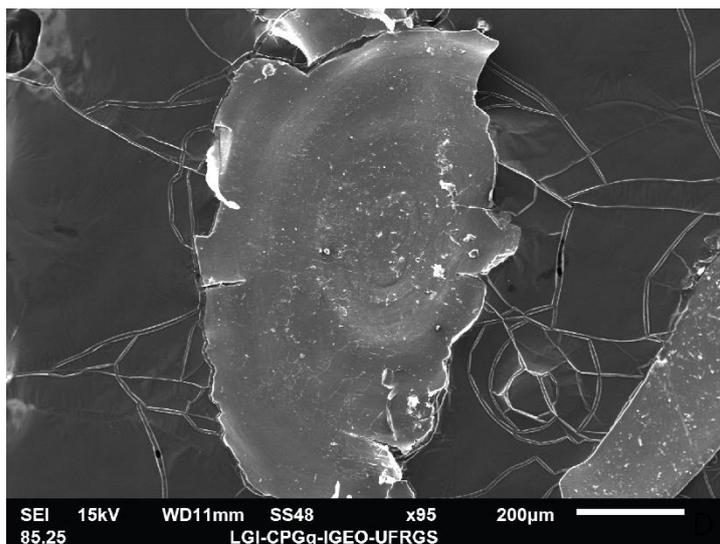


Figura 55 - Fragmento de escama.

### *Fração inferior a 10 µm*

Esta fração, quando analisada em MEV, apresenta grande variedade de componentes. Além de material argiloso placóide, tem-se fragmentos de **diatomáceas** de diversas espécies que não puderam ser identificadas (Figuras 56 A, B, C e D).

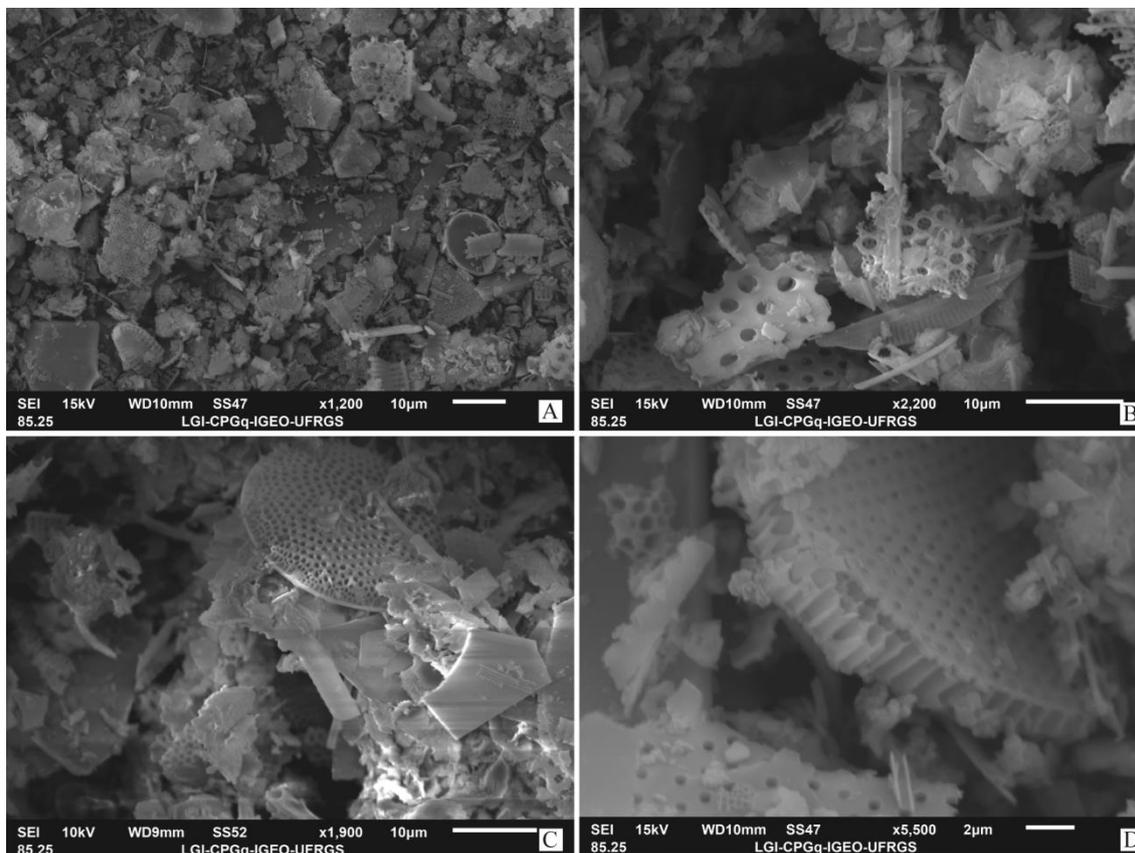


Figura 56 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A), imagens de detalhe (B e C), evidenciando parede de diatomácea (D).

### 4.11 Amostra WBHC

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (50%), Classe 6 (10%), Classe 4 (10%) e Classe 5 (10%).

### *Fração mista*

Esta amostra não foi dividida em fração com presença e ausência de pesos devido a escassez de material com tamanho superior a 10 µm. Quanto às suas características, apresenta predominância de cristais incolores sobre os translúcidos e opacos. Micáceas ocorrem em relativa abundância. A granulometria varia entre areia fina e silte (Figura 57).

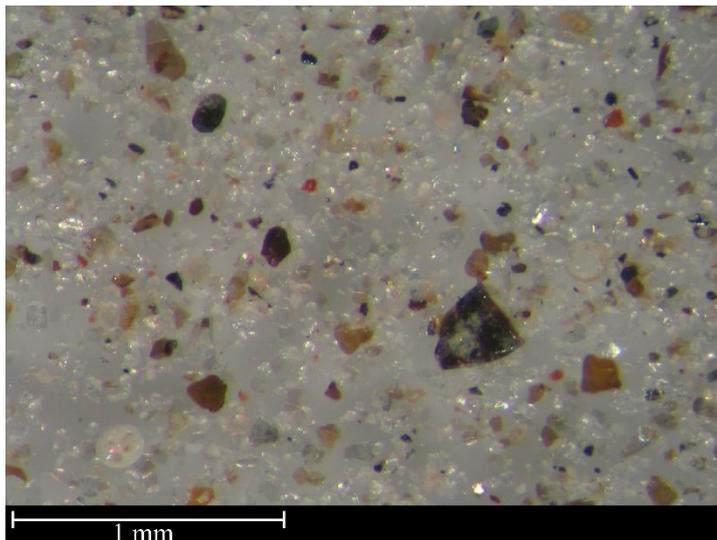


Figura 57 - Aspecto geral da amostra vista em lupa.

### *Mineralogia*

Quando analisada por difratometria de raios X, a fração com maior concentração de minerais pesados apresenta grande variedade mineralógica. Foram identificados esmectita, micas, anfibólio, piroxênios, quartzo e feldspatos (Figura 58 A). Tal variedade é corroborada pela análise de lupa feita anteriormente.

Foram identificados cristais de **quartzo** que apresentam-se tanto com coloração cinza quanto incolores. Comumente aqueles grãos de coloração possuem inclusões opacas aciculares em seu interior. Quanto à sua forma, costumam ser grãos angulosos.

Alguns minerais micáceos foram individualizados, como a **muscovita** (Figura 59 A), incolor, e **biotita**, que apresenta tons que variam do marrom ao castanho-avermelhado.

Na forma de cristais de maior tamanho tem-se **actinolita**, de cor cinza e bem arredondada. Já os grãos de **apatita** (Figura 59 B) e de **óxidos de ferro** apresentam granulometria inferior à moda da amostra. Respectivamente, o primeiro mineral apresenta tonalidade amarronada e é raro, e o segundo possui cor preta e brilho vítreo. Ressalta-se que a impossibilidade de identificar qual espécie de óxido de ferro é constituinte do mineral se deve as limitações da metodologia por EDS. Porém, com base em características físicas pode-se inferir que os grãos sejam de magnetita, lepidocrocita ou goethita. **Ortopiroxênio** de habito prismático a placoide e de coloração esverdeada também foram identificados.

Quanto aos componentes biogênicos, tem-se a presença escassa de **conchas** de calcita e de coloração branca. As **diatomáceas** também apresentam tons esbranquiçados, e são relativamente mais comuns que as conchas.

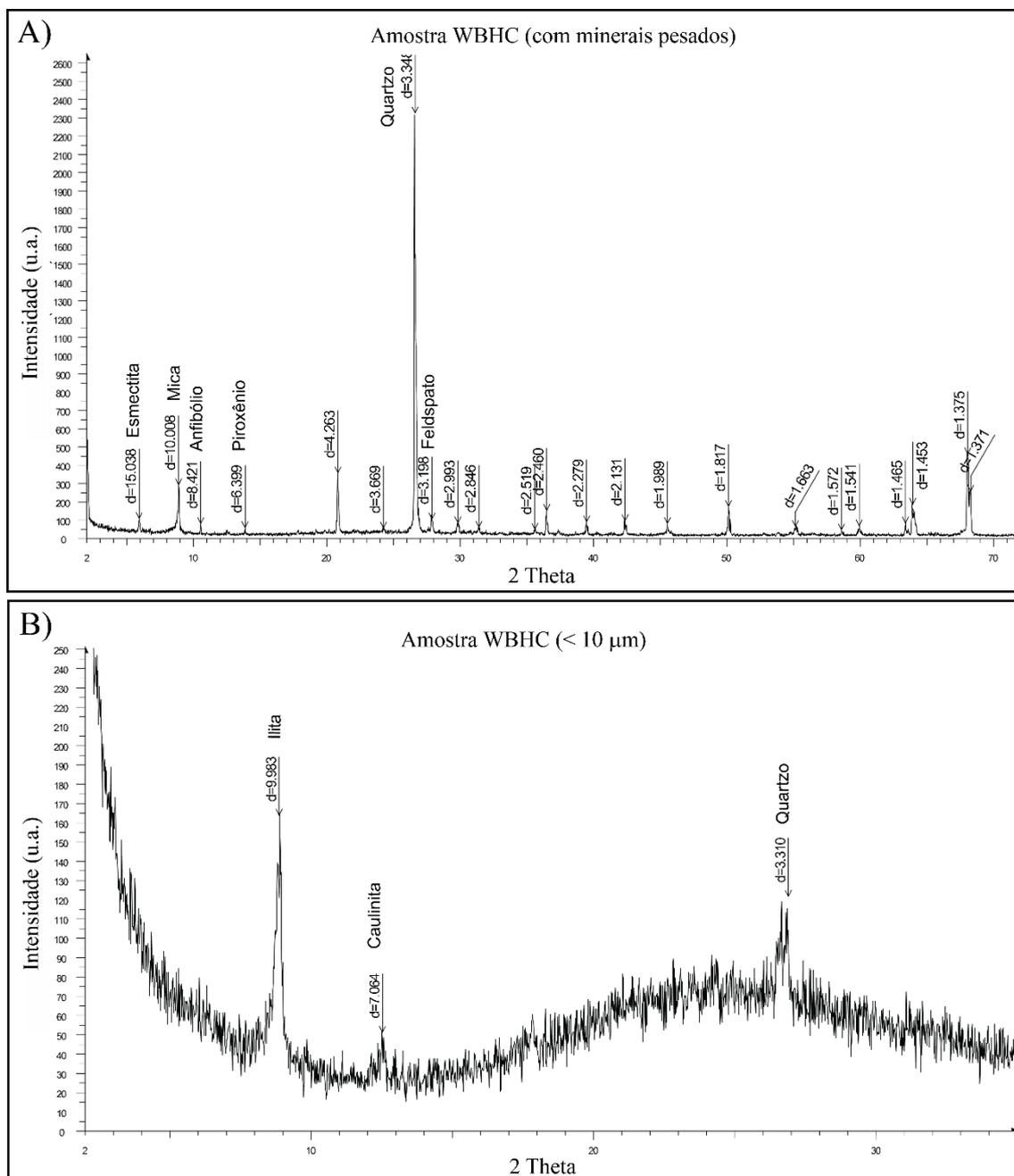


Figura 58 - Difratograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

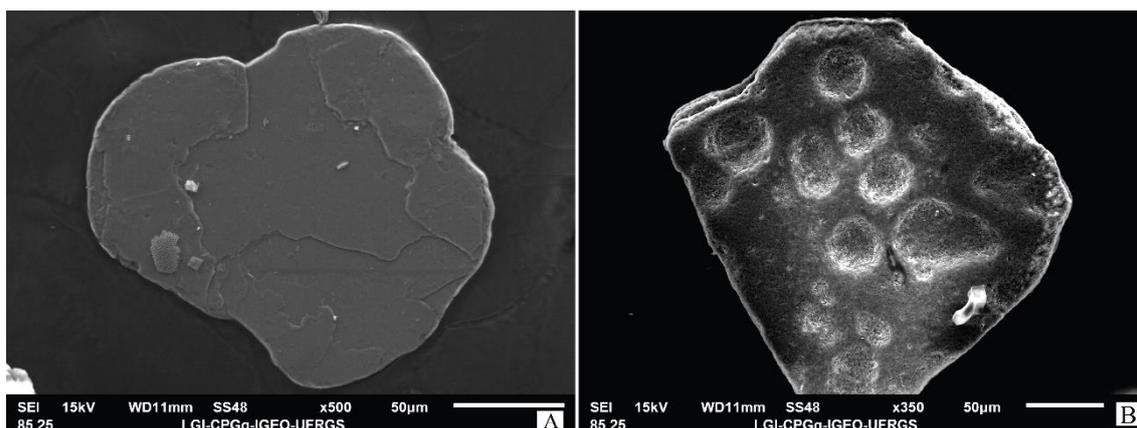


Figura 59 - Grão de mineral micáceo (A) e apatita (B).

#### *Fração inferior a 10 µm*

A partir das observações em MEV foi possível identificar a presença abundante de fragmentos de diatomáceas, com variável padronagem de orifícios, e também diversos componentes aciculares. Acumulados de argilominerais também encontram-se em abundância (Figura 60 A e B).

As análises por DRX evidenciam a presença de clorita, ilita, caulinita, biotita e quartzo. Este último compoendo o material de origem biológica (Figura 58 B).

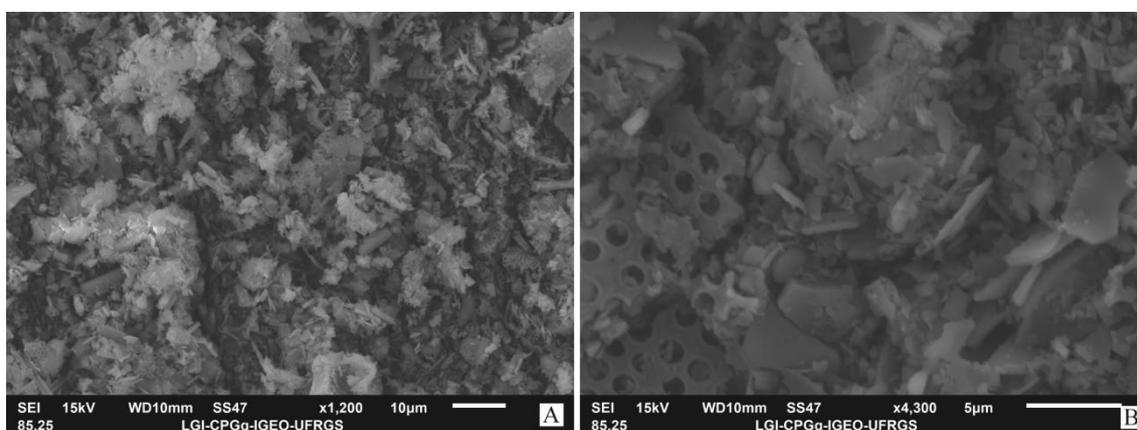


Figura 60 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e detalhe de diatomáceas (B).

#### 4.12 Amostra ZZ1

A estimativa de proporções desta amostra  $>10\ \mu\text{m}$  consiste em Classe 1 (50%), Classe 4 (50%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração da amostra apresenta abundância de minerais incolores, muito límpidos e angulosos. Em menor quantidade tem-se minerais alaranjados e pretos. Quanto a granulometria, varia entre areia fina e muito fina, com poucas exceções em tamanho menor. Comumente os grãos apresentam-se muito angulosos e anédricos (Figura 61 C).

##### *Fração com presença de minerais pesados*

A porção com acúmulo de material pesado é composto majoritariamente por micas de diversas tonalidades, como incolor, marrom, avermelhado e cinza. Cristais incolores e esverdeados, anédricos, ocorrem em menor quantidade. A granulometria varia de areia fina à silte. Os minerais micáceos ocorrem comumente em tamanho areia fina (Figura 61 B).

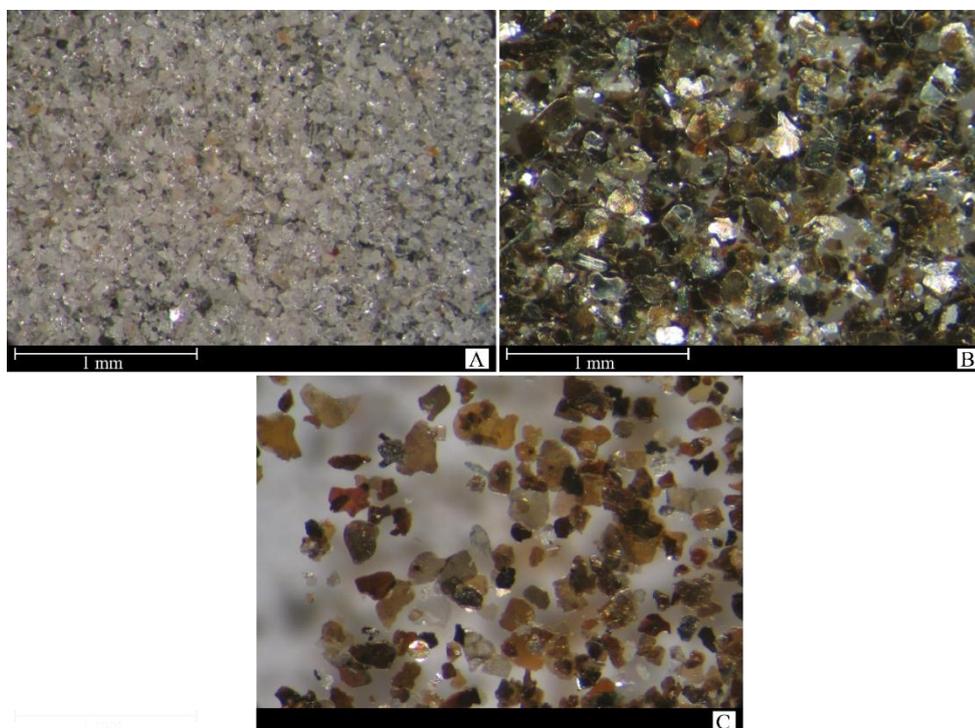


Figura 61 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. Variedade de minerais micáceos (C).

### *Mineralogia*

A fração com presença de minerais pesados apresenta mineralogia menos variada quando analisada por difratometria de raios X. Foram identificados picos de micas e caulinita, muito bem marcados, assim como de quartzo e feldspatos (Figura 62 A).

Os principais constituintes desta amostra são **quartzo**, **k-feldspato** e **albita** (Figura 63 B). Grande parte destes cristais possui forma de ocorrência similar, sendo predominantemente incolores, transparentes ou translúcidos e com nível de arredondamento variado. Geralmente quartzo ocorre de forma mais angulosa, enquanto os feldspatos são mais arredondados. Albita pode ocorrer em tonalidade preta, branca e laranja, enquanto que o k-feldspato pode ocorrer incolor ou branco. Por vezes os cristais destes dois feldspatos apresentam inclusões opacas avermelhadas ou alaranjadas, bem dispersas no interior dos grãos.

**Biotita** comumente ocorre em tons acinzentados, pretos ou castanhos, já a **muscovita** ocorre incolor (Figura 63 A). A soma dos componentes micáceos faz com que esta seja a classe mineral mais abundante da amostra. Existe grande variedade de espécies minerais, como **clinoanfíbólios** que ocorrem anédricos e prismáticos, **ilmenita** opaca alaranjada e **silimanita** acinzentada prismática. **Apatita** ocorre de forma translúcida e amarronada e **ortopiroxênios** (Figura 63 C) em tonalidade preta.

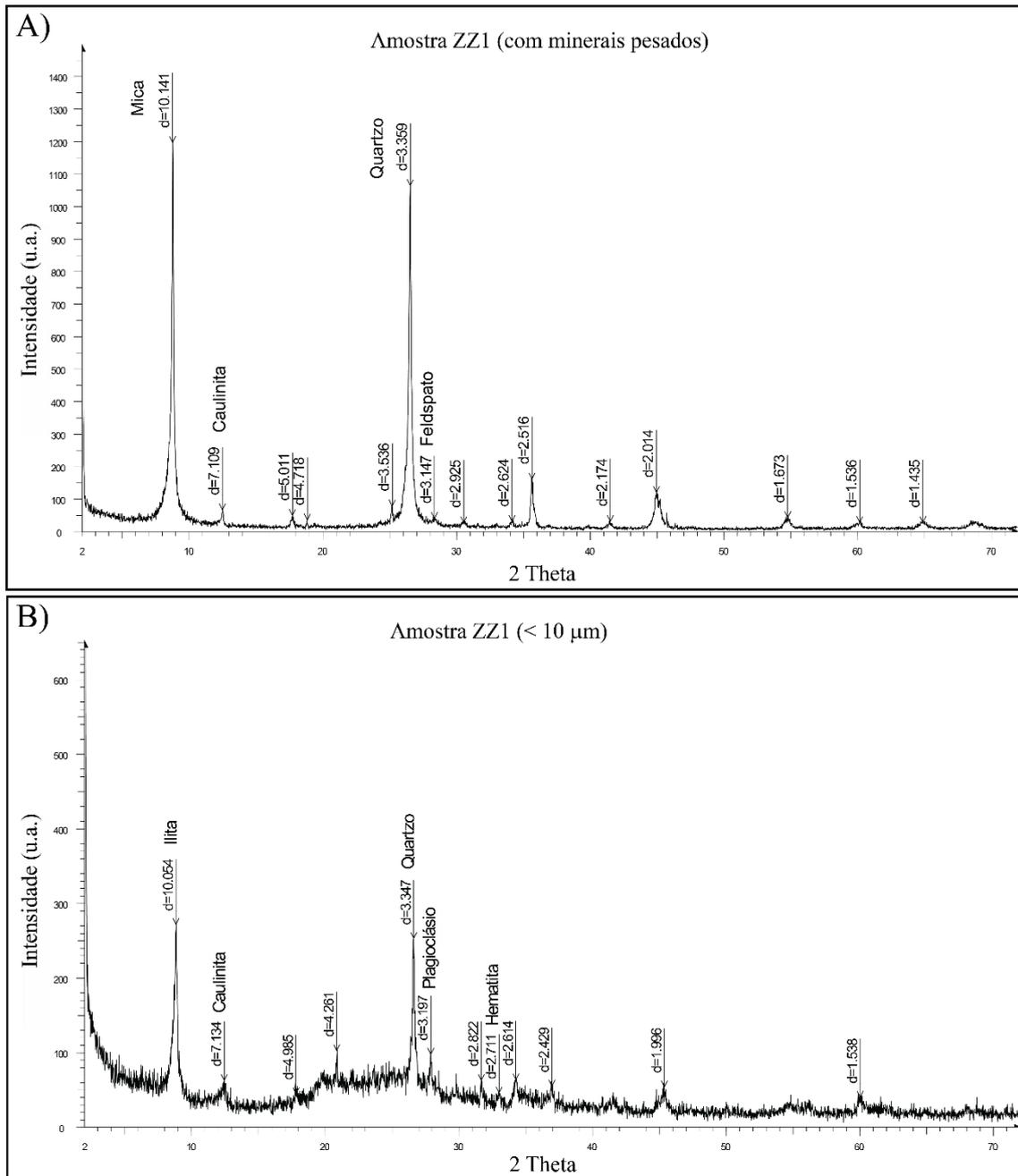


Figura 62 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 μm (B).

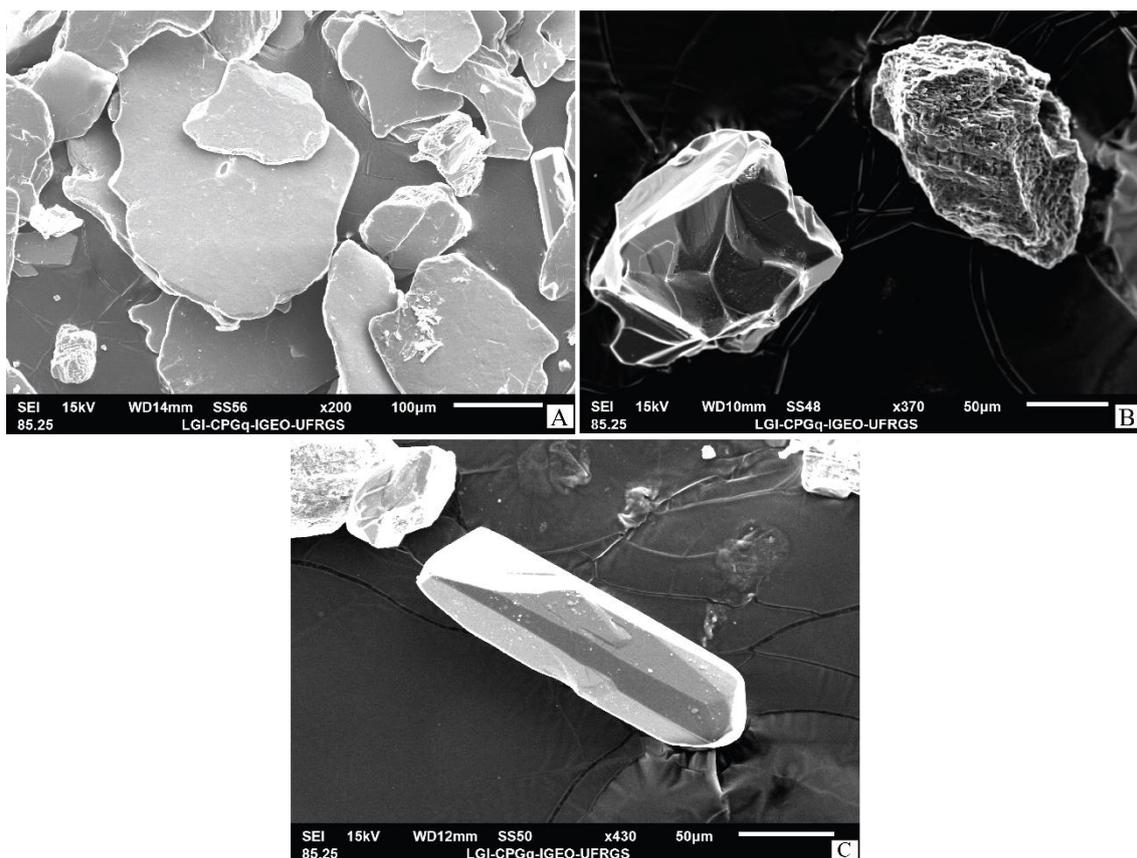


Figura 63 - Minerais micáceos (A), grão de quartzo a esquerda e feldspato a direita (B) e grão de piroxênio (C).

#### *Fração inferior a 10 µm*

Quando analisado em MEV, pode-se verificar a presença abundante de fragmentos de materiais biológicos, tais como diatomáceas, tubos, bolachinhas. Os argilominerais não apresentam-se muito aglomerados e comumente tem-se placas micáceas (Figura 64).

Os resultados por difração evidenciam a presença de ilita, caulinita, clorita, calcita, dolomita, plagioclásio e quartzo. Os carbonatos e quartzo evidenciam a presença dos materiais biológicos. Também tem-se hematita presente nos difratogramas (Figura 62 B).

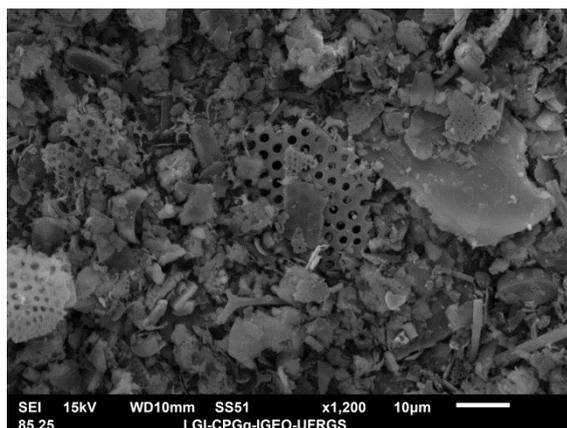


Figura 64 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm .

#### 4.13 Amostra ZZ3

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 4 (45%), Classe 1 (40%) e Classe 7 (5%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração é composta minerais incolores em abundância, com alguns cristais de outras tonalidades. A variação de granulometria consiste de areia muito fina a silte, com algumas exceções raras em tamanho de areia média (Figura 65 A).

##### *Fração com presença de minerais pesados*

O aspecto geral desta fração demonstra grandes massas floculadas de tonalidade bege. Prováveis argilominerais agem como cimentadores de grãos de maior tamanho, gerando assim grandes massas floculadas. Pode-se distinguir minerais micáceos tanto na porção desagregada quanto na agregada. A granulometria varia entre areia muito fina e argila (Figura 65 B).

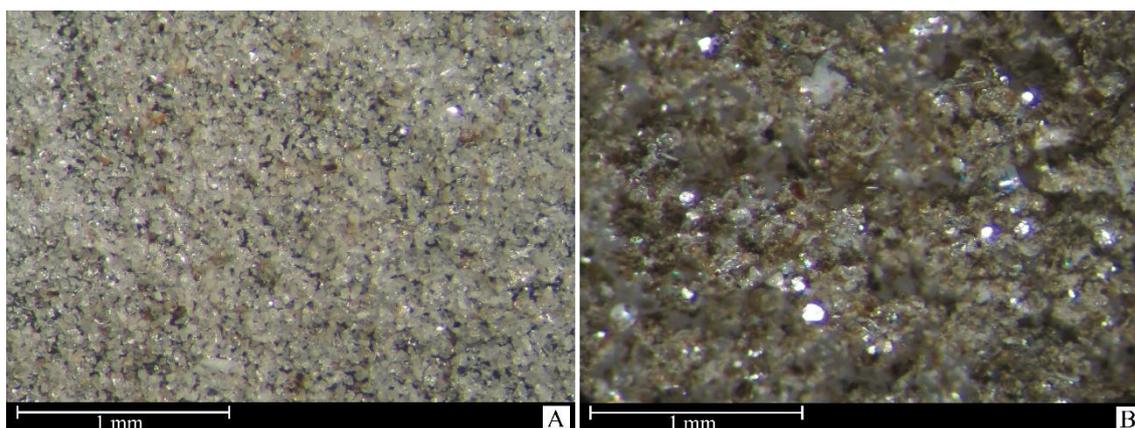


Figura 65 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

### *Mineralogia*

A fração com maior concentração de minerais pesados e magnéticos apresentou composição majoritária de quartzo, ilita, caulilita, micas e feldspato (Figura 66 A). Tal ocorrência verificada pela difratometria de raios X, pode ser associada à análise por lupa, onde foi averiguada a presença abundante de filossilicatos, bem como no difratograma.

**Quartzo** ocorre como principal constituinte desta amostra, podendo variar em tamanho e tonalidade, sendo incolor ou branco. Comumente ocorre com grande angulosidade, mas em sua maioria sua forma é arredondada. Tais características fazem com que este mineral seja muito similar a **k-feldspato**, que apresenta ocorrência similar. Este feldspato pode apresentar-se em tonalidade cinza, assim como a **albita**.

Micas também foram identificadas, sendo as incolores da espécie **muscovita** e as castanhas e avermelhadas **biotita**. Este último mineral também foi identificado em meio a espécie de matriz de tonalidade bege e granulometria muito fina presente na amostra.

Componentes biogênicos foram identificados como **diatomáceas** e apresentam composição de quartzo. Ocorrem comumente em tonalidade branca, mas por vezes em coloração preta e com brilho iridescente.

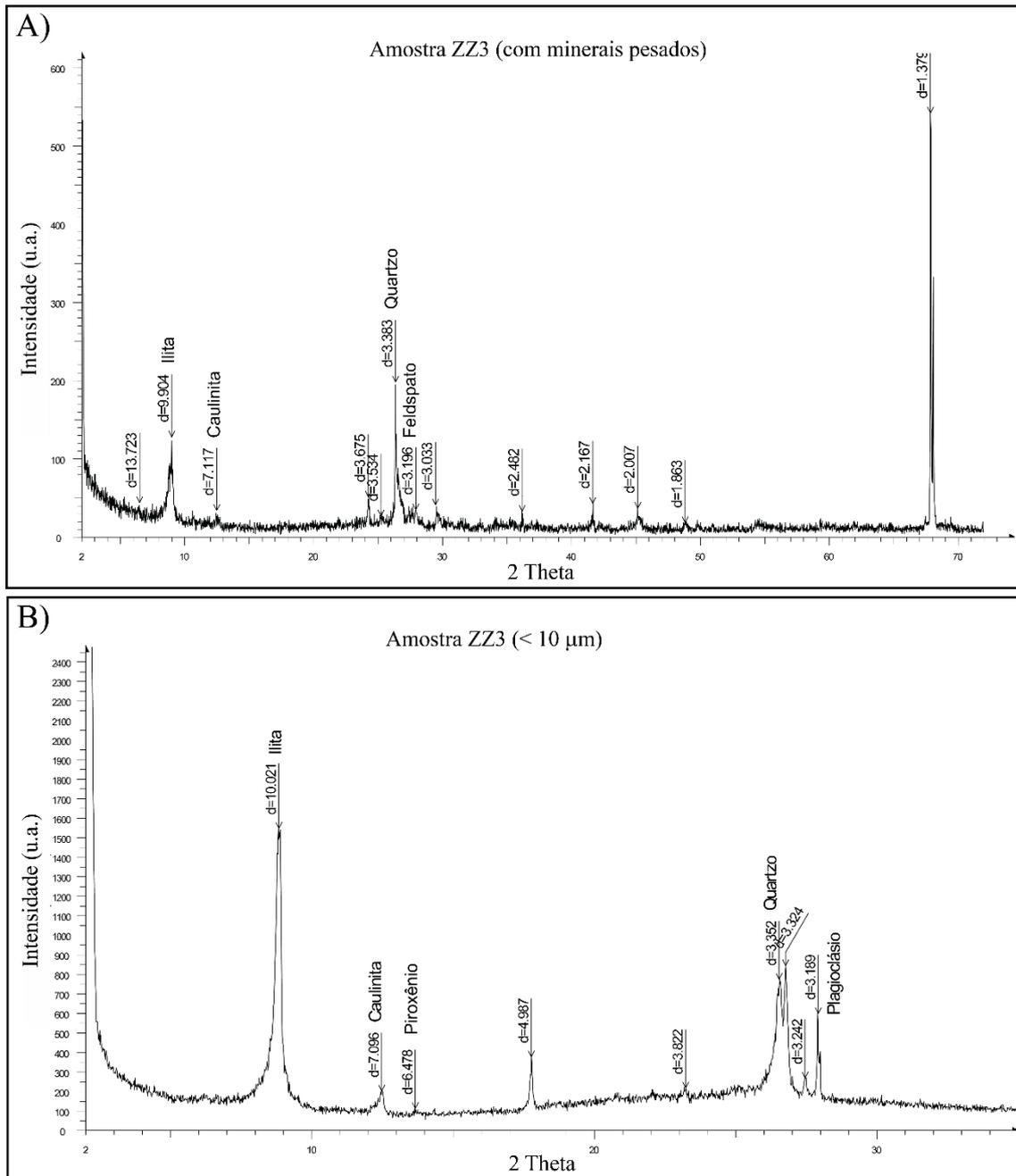


Figura 66 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

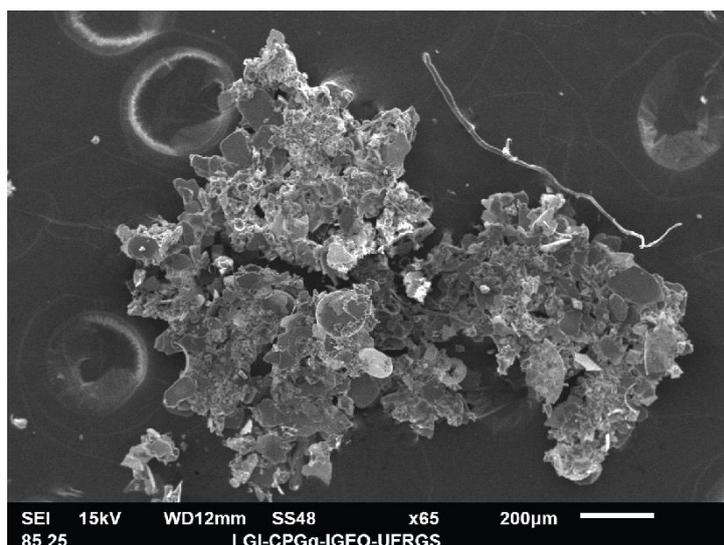


Figura 67 - Floco mineral em detalhe.

#### *Fração inferior a 10 µm*

Quando analisado em MEV é possível verificar a presença abundante de fragmentos de **diatomáceas** e de demais microrganismos marinhos. **Espículas de esponjas** e outros componentes não caracterizados ocorrem de forma menos abundante. Quanto aos argilominerais, ocorrem em tamanho da ordem de 1 µm e aglomerados (Figuras 68 A e B).

As análises por DRX demonstraram a presença de ilita, caulinita, plagioclásio, calcita e quartzo. Estes dois últimos componentes são provenientes das carapaças (Figura 66 B).

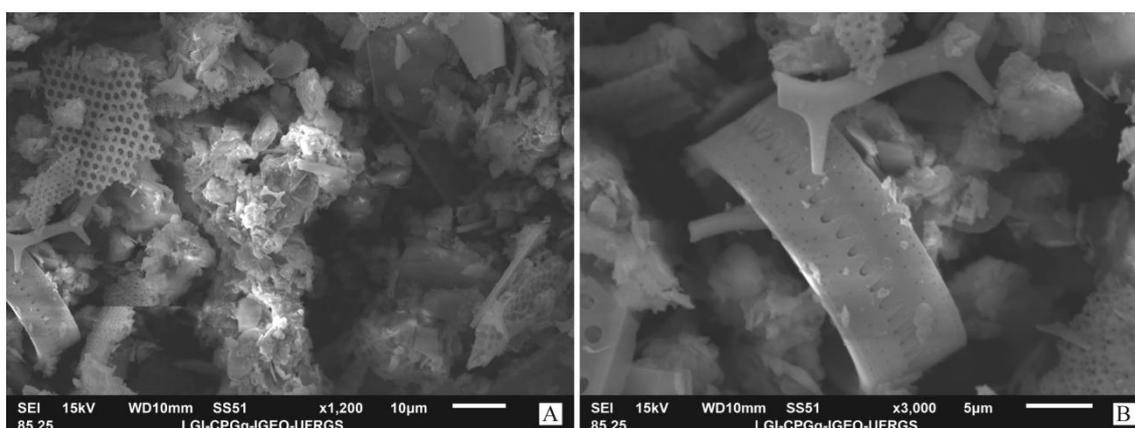


Figura 68 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm (A) e diatomácea com fragmento de radiolária (B).

#### 4.14 Amostra ZZ7

A estimativa de proporções desta amostra consiste em Classe 1 (70%), Classe 2 (20%) e Classe 7 (10%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Os principais constituintes desta amostra são os minerais que apresentam-se incolores ou levemente esbranquiçados. Alguns minerais de tonalidade escura ocorrem, porém escassamente. A granulometria varia entre areia fina e areia muito fina (Figura 69 A).

##### *Fração com presença de minerais pesados*

A fração apresenta abundância de minerais translúcidos de tonalidade acinzentada, assim como incolores com grande quantidade de inclusões opacas em seu interior. Alguns componentes alaranjados também foram verificados. O material apresenta tamanho de areia muito fina e os grãos apresentam-se moderadamente arredondados no geral (Figura 69 B).

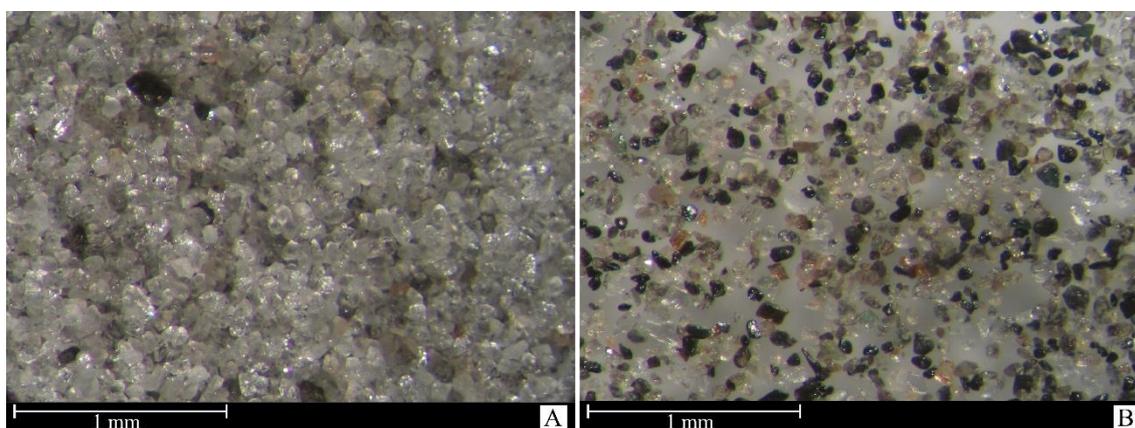


Figura 69 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

##### *Mineralogia*

O difratograma resultante da análise da fração com concentração de minerais pesados desta amostra apresenta a existência abundante de minerais micáceos, de anfibólios, feldspatos, quartzo e apatita (Figura 70 A). Diferentemente das demais amostras, as apatitas apresentam-se melhor cristalizadas nesta amostra, portanto são passíveis de análise por esta metodologia.

**Quartzo** ocorre abundantemente na amostra, especialmente em sua variedade incolor e com inclusões opacas (Figura 23 C). Por vezes estas inclusões são tão abundantes que tornam a cor aparente do mineral cinza escuro. **Plagioclásio** ocorre em tonalidades acinzentadas, enquanto que a **albita** ocorre branca ou alaranjada. Translúcido, cinza e com hábito de prismas curtos tem-se comumente **silimanita**.

**Biotita** ocorre em menor abundância, com hábito placoide e coloração marrom. De tonalidade preta e variando tanto em diafaneidade quanto em hábito, tem-se **apatitas** (Figura 71 A). Este mineral pode apresentar-se anédrico, placoide ou prismático.

**Clinoanfíbólios** foram identificados nas cores preta e verde, por vezes anédricos, por vezes prismáticos. Similarmente tem-se **clinopiroxênio** preto (Figura 71 B). **Titanita** ocorre em menor abundância e em tonalidades rosadas. Já a **grossulária** apresenta-se amarela e com inclusões opacas.

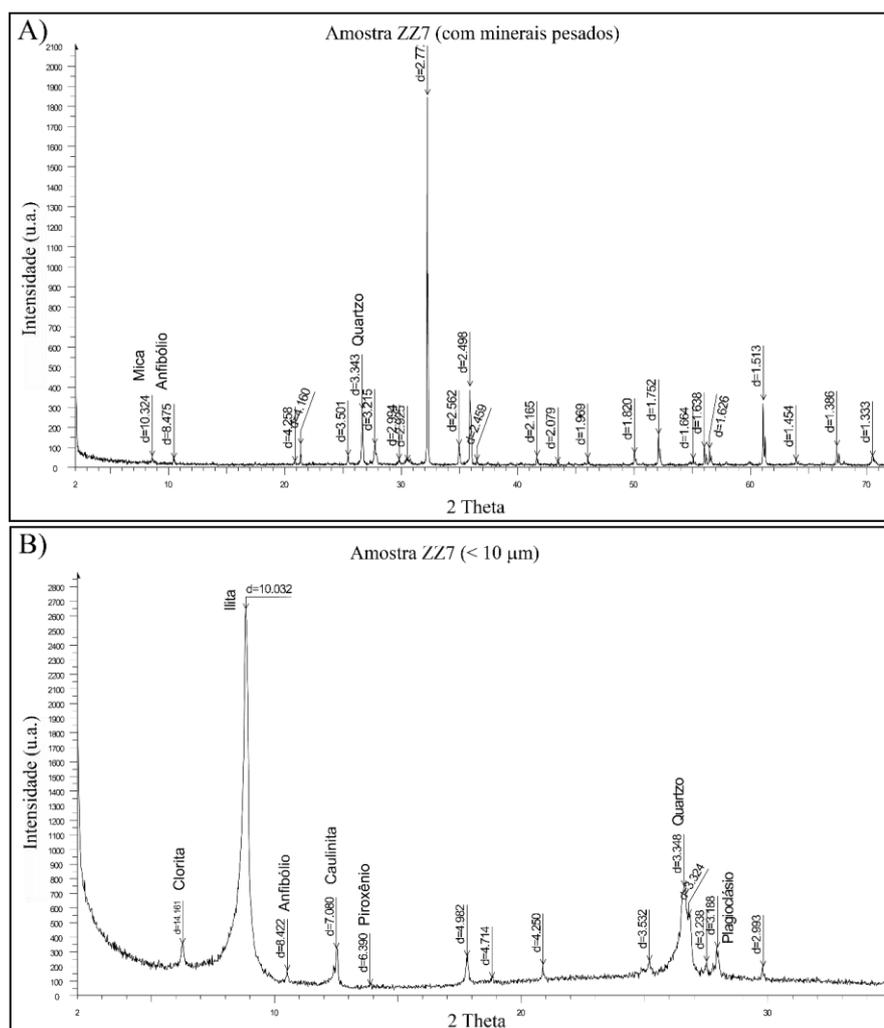


Figura 70 - Difratograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 μm (B).

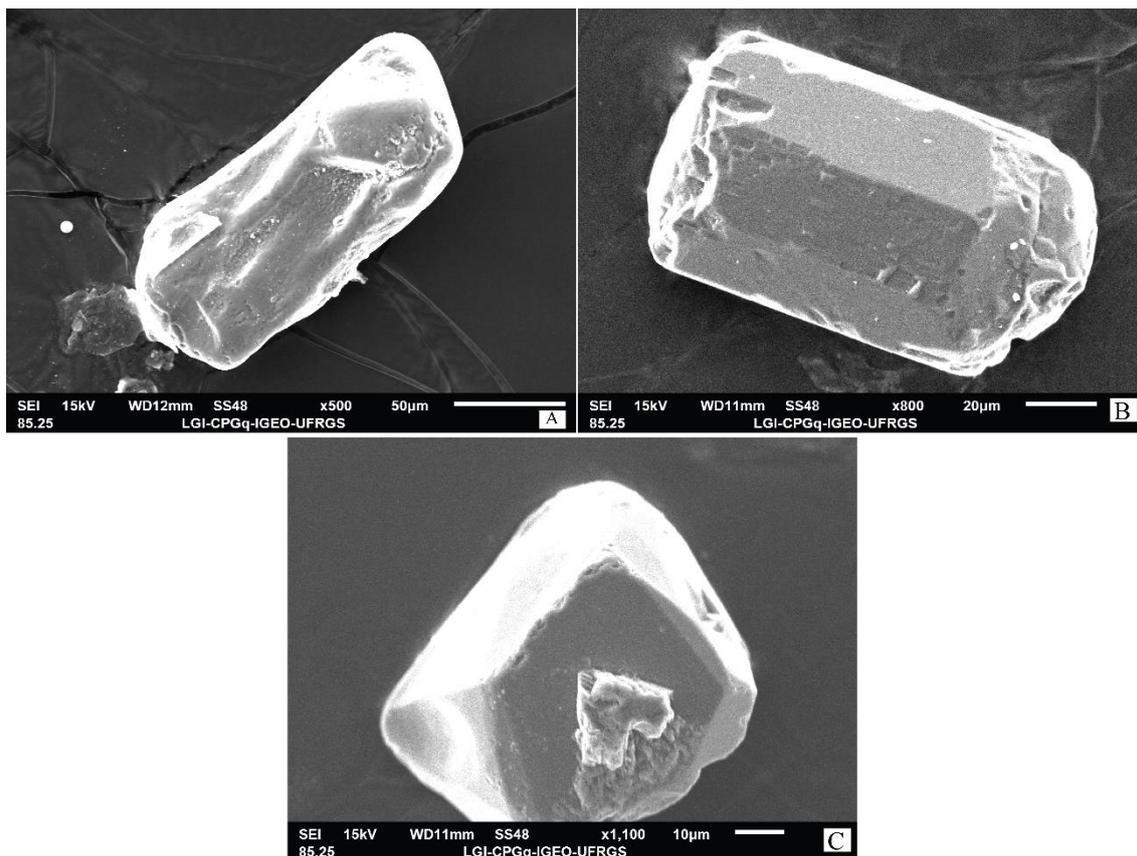


Figura 71 - Grão prismático de apatita (A), prismático de piroxênio (B) e quartzo facetado (C).

*Fração inferior a 10 µm*

Esta porção da amostra não apresenta resquícios de microrganismos marinhos, somente aglomerados de argilominerais. Por vezes são formadas grandes massas argilosas de mais de 10 µm (Figura 72).

As análises por DRX evidenciam a presença de clorita, illita, caulinita, plagioclásio e quartzo. Desta forma a ausência de minerais carbonáticos confirma a inexistência de componentes biológicos em quantidade relevante (Figura 70 B).

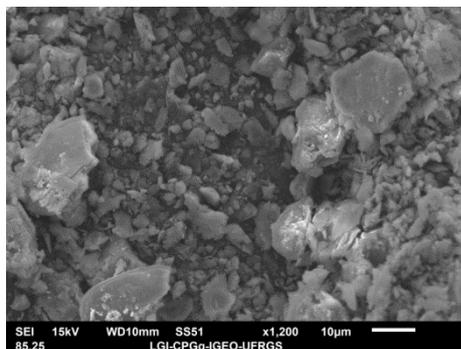


Figura 72 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm .

#### 4.15 Amostra ZZ8

A estimativa de proporções minerais desta amostra consiste em fragmentos de conchas e microfósseis (85%), Classe 1 (10%) e Classe 4 (10%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração apresenta predominância de material biológico em relação ao material de origem não biológica. Quando analisado em lupa é possível perceber que a abundância de fragmentos e carapaças de microrganismos supera muito a quantidade de componentes minerais. Sendo assim, a granulometria é muito variada, iniciando em argila e chegando até areia grossa, conferindo assim grau de seleção baixo à amostra. O grau de arredondamento dos componentes minerais é baixo, e os fragmentos também apresentam-se muito angulosos (Figura 73 A).

##### *Fração com presença de minerais pesados*

Esta fração da amostra apresenta-se muito similar à descrita anteriormente, com exceção pela maior quantidade de cristais minerais. Apesar de maior, a relação entre carapaças e cristais é muito alta, sendo estes primeiros os principais constituintes da amostra. Existe grande variabilidade granulométrica, variando de silte a areia grossa, e nota-se que as frações maiores que areia muito fina são constituídas quase exclusivamente de materiais biológicos, sejam eles fragmentos ou carapaças preservadas de diversas espécies de microrganismos. Sendo assim, a fração mais fina é a que apresenta variabilidade mineralógica (Figura 73 B).

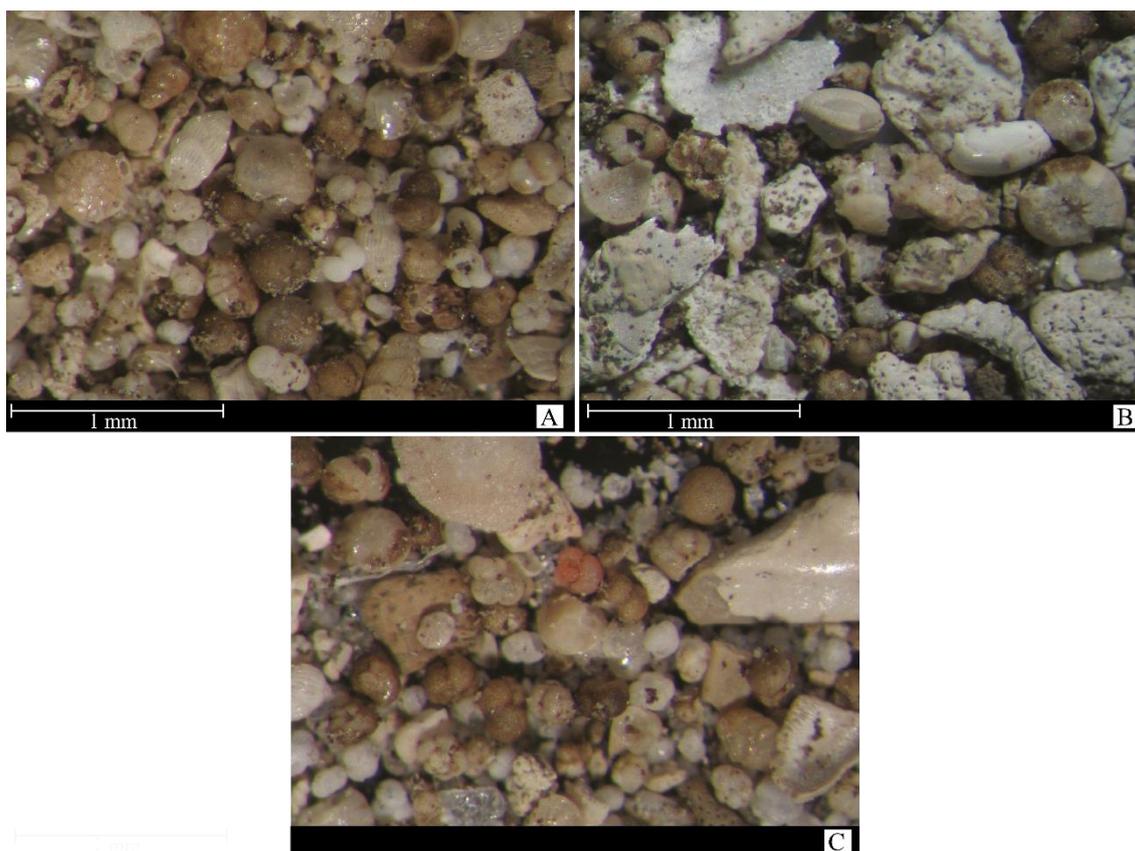


Figura 73 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa. Detalhe de foraminíferos de diversas colorações (C).

### *Mineralogia*

Ao ser analisada pelo método da difratometria de raios X, foi possível identificar, na fração com presença de minerais pesados, quartzo, feldspatos e calcita como constituintes majoritários da amostra (Figura 74 A). Tal dado corrobora a análise feita em lupa, onde a quantidade de microrganismo calcáreos era superior ao de materiais silicáticos. Tal relação pode ser observada no difratograma, devido a intensidade do pico da calcita, superior aos outros.

**Quartzo** ocorre em duas variedades, de tonalidade cinza e arredondado, e incolor e anguloso. Similarmente ocorrem grãos de **k-feldspato**, que são muito difíceis de serem diferenciados em análise em lupa.

**Apatita** ocorre em relativa abundância e apresenta-se em tonalidades de preto e marrom. Por vezes seu hábito é placóide, outras encontra-se totalmente anédrico e arredondado (Figura 75 A). Com hábito prismático, por vezes anédrico e de coloração preta tem-se **clinopiroxênio**, pouco comum porém de fácil identificação devido a sua

forma e arestas bem marcadas. **Cordierita** ocorre raramente com tonalidade laranja e opaco.

Os principais componentes desta amostra são os fragmentos de microrganismos. Suas carapaças e fragmentos costumam apresentar tonalidade bege e diafaneidade que varia entre translúcido e opaco. Algumas espécies apresentam colorações diferentes da maioria, como branco e laranja. Sendo assim, tem-se grande variedade (Figura 73 C). Fragmentos de **conchas** (Figura 75 B) são muito comuns, muitas vezes evidenciando os planos de crescimento das mesmas. **Foraminíferos** podem ser bentônicos, do gênero *Ammonia* e *Uvigerina*, entre outros que não puderam ser identificados. Quanto aos plantônicos, podem ser dos gêneros *Globigerina* e *Globorotalia*, entre outros. Possíveis fragmentos de **gastropodes** e **briozoários** também são presentes em menor abundância. **Corais** do gênero *Millepora* também estão presentes.

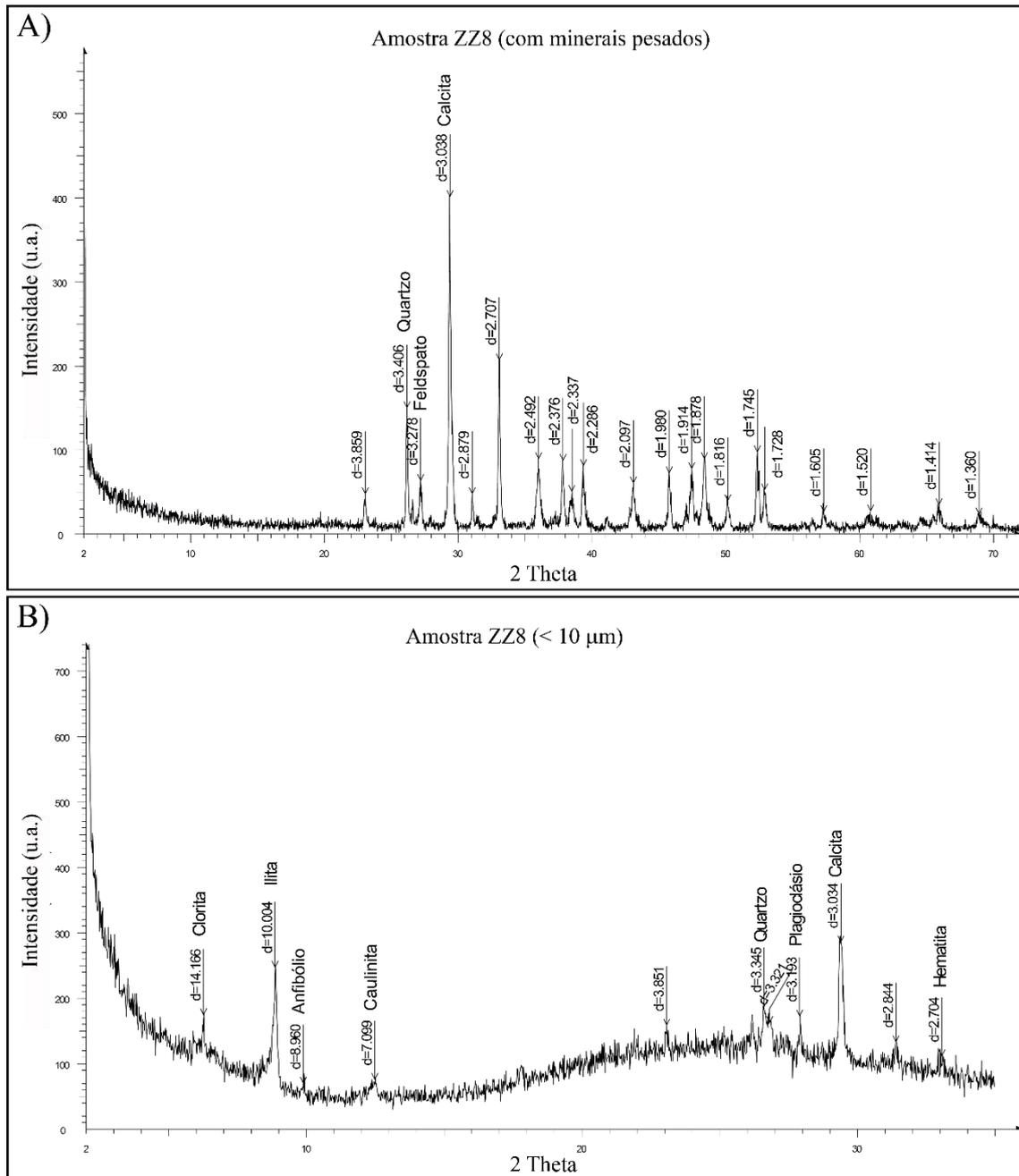


Figura 74 - Difratograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10 μm (B).

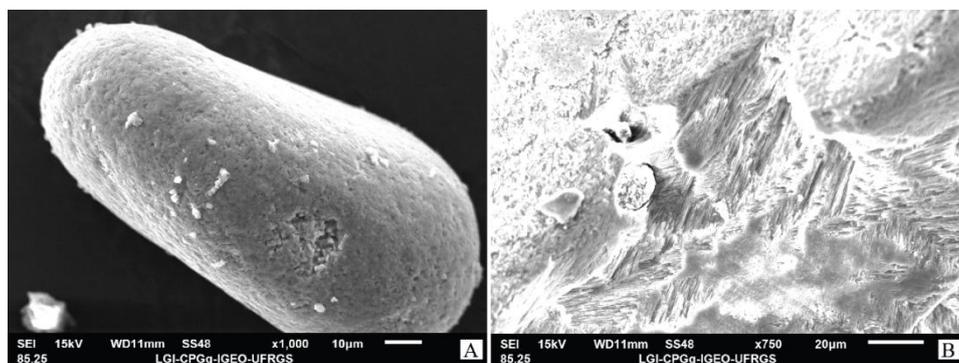


Figura 75 - Apatita arredondada (A) e detalhe nos planos de crescimento de conchas (B).

### *Fração inferior a 10 µm*

Esta fração apresenta quantidade reduzida de materiais de origem biológica, como **diatomáceas** e **bolinhas** com espinhos. Os argilominerais comumente encontram-se aglomerados e alguns grãos placoides da ordem de 10 µm também se dão presentes (Figura 76).

As análises por DRX evidenciaram a presença de clorita, ilita, caulinita. Hematita, quartzo, calcita e plagioclásio (Figura 74 B).

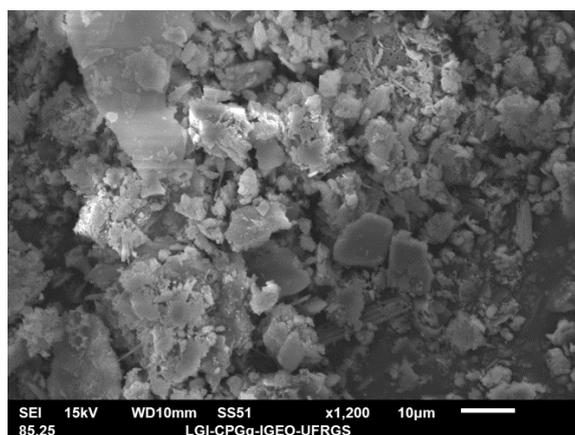


Figura 76 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm .

#### 4.16 Amostra ZZ9

A estimativa de proporções minerais desta amostra consiste em Classe 1 (85%), Classe 3 (5%), Classe 4 (5%) e Classe 7 (5%).

##### *Fração com ausência de minerais pesados*

Esta fração da amostra apresenta predominância de minerais incolores em relação aos esbranquiçados, com teores mínimos de minerais opacos e alaranjados. A granulometria varia de aria fina a muito fina e os grãos apresentam grande variedade no grau de arredondamento (Figura 77 A).

##### *Fração com presença de minerais pesados*

Esta porção da amostra apresenta maior variabilidade composicional, que pode ser percebida pela presença abundante de cristais incolores, seguidos de opacos também em grande quantidade. Sua granulometria varia de areia fina a silte e os grãos

apresentam grande variabilidade de forma, mas no geral apresentam-se moderadamente arredondados (Figura 77 B).

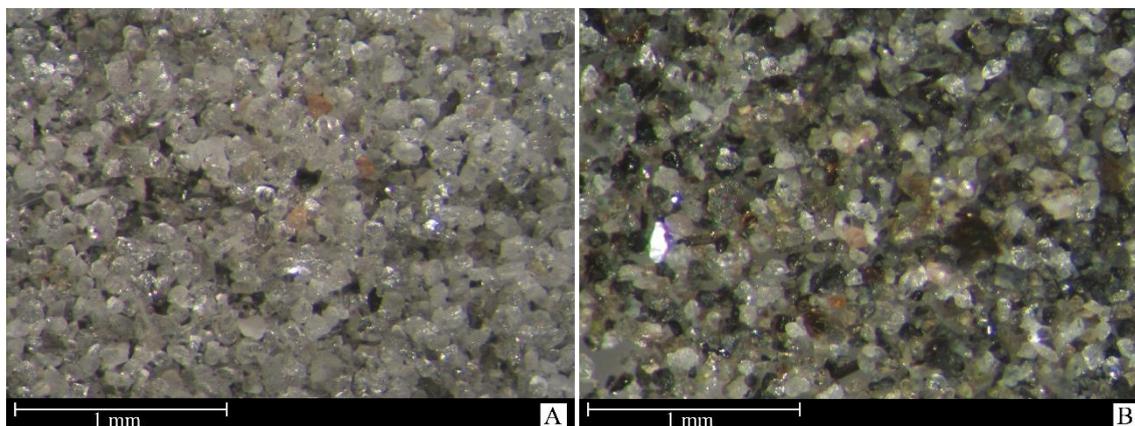


Figura 77 - Fração com ausência de minerais pesados (A) e presença de minerais pesados (B), observado em lupa.

### *Mineralogia*

A mineralogia majoritária da fração com minerais pesados da amostra pode ser analisada a partir de análise por difratometria de raios X. Dentre os minerais identificados, tem-se quartzo, feldspatos, micas e calcita (Figura 78 A). Dentre estes componentes, quartzo e feldspatos compõem maior parte da amostra, como já inferido a partir de análise em lupa.

**Quartzo** ocorre em abundância e na sua variedade incolor, podendo apresentar inclusões pretas ou alaranjadas em menor abundância. Geralmente apresenta-se anédrico e muito anguloso e por vezes até cinza escuro. Quanto aos feldspatos, tem-se **k-feldspato** de tonalidade branca, e **albita** de tonalidade cinza, ambos moderadamente arredondados. Incolor e de hábito placoide tem-se **muscovita**, e em tonalidade marrom **biotita**.

Apresentando tonalidades escuras tem-se **apatita** e **fluorapatita**, que ocorrem em cor preta e marrom. Diferencia-se a apatita do **clinoanfíbólio** preto pelo hábito, pois este segundo é prismático e mais anguloso. **Alumínio metálico** também é encontrado mais raramente, apresentando hábito fibroso e com brilho excepcional. **Silimanita** também ocorre prismática e em tonalidade acinzentada, muito similar a alguns grãos de apatita. **Clinopiroxênio** e **ortopiroxênio** ocorrem tanto prismáticos quanto anédricos, esverdeados quanto pretos. **Turmalina** ocorre raramente levemente prismática e em tonalidades escuras.

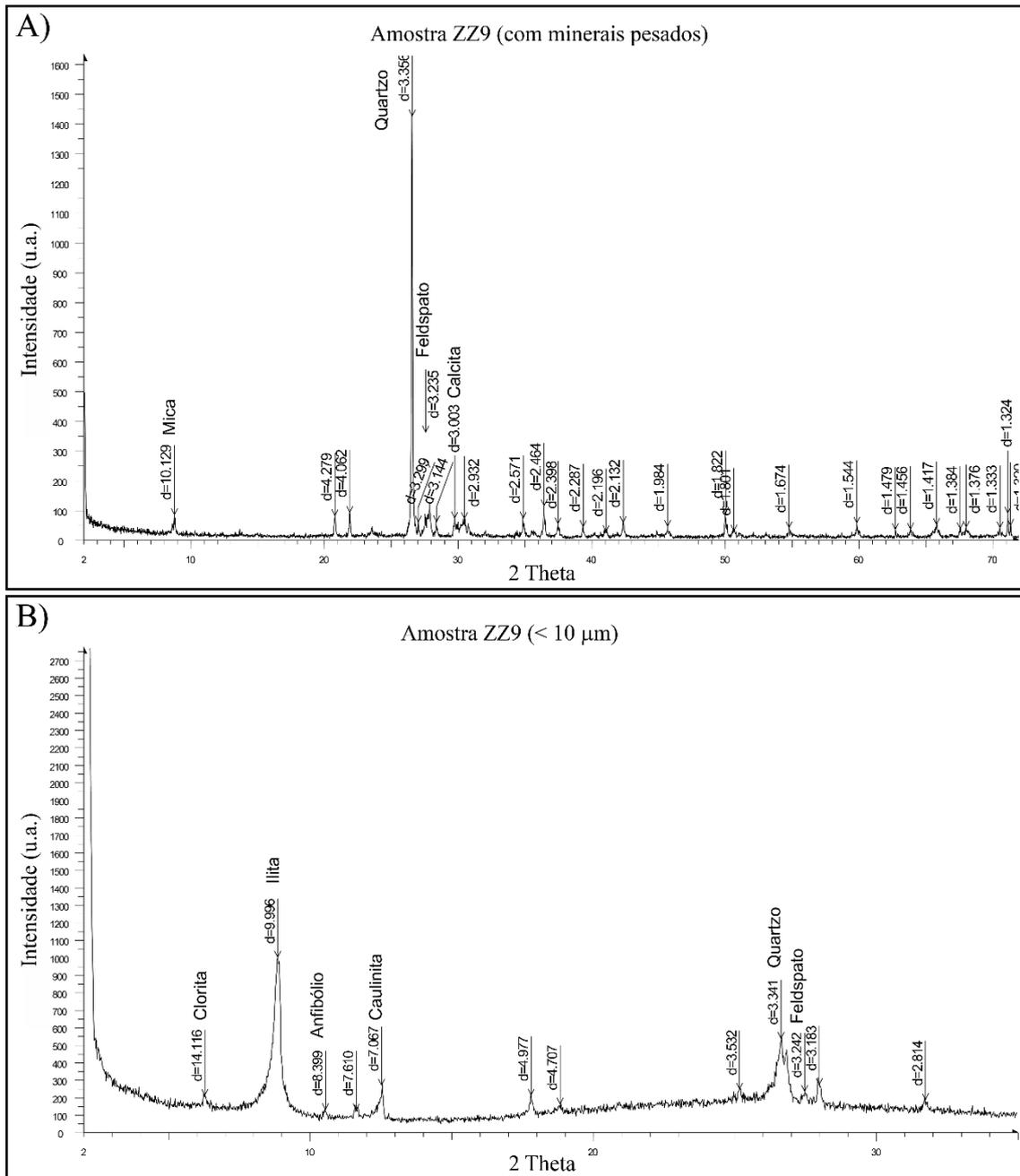


Figura 78 - Difratoograma da fração com presença de minerais pesados (A) e fração inferior a 10  $\mu\text{m}$  (B).

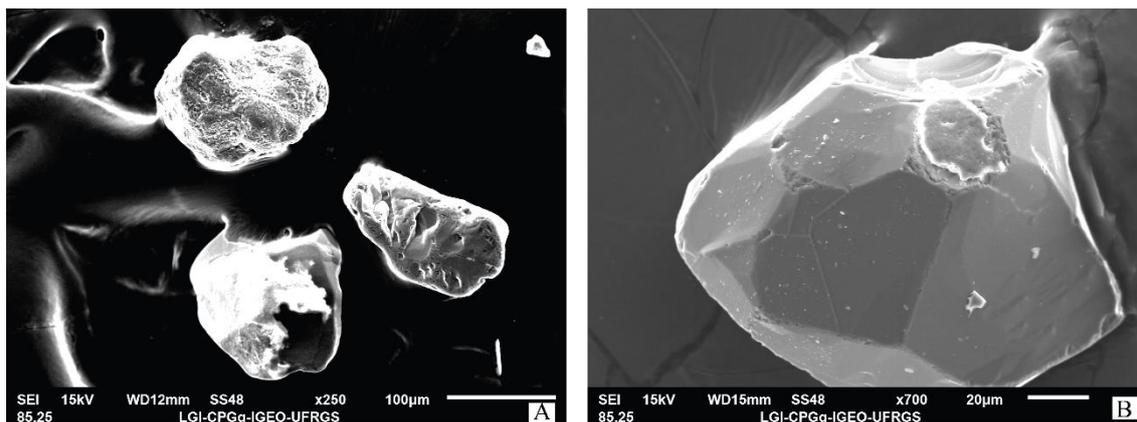


Figura 79 - Grãos arredondados de feldspatos (A) e grão facetado de quartzo (B).

#### *Fração inferior a 10 µm*

Esta amostra apresentou escassez de materiais biológicos e é relativamente abundante em minerais placoides de maior tamanho, argilominerais (Figura 80) Quando analisado por difratometria de raios X, esta amostra apresentou os minerais clorita, illita, anfibólio, caulinita, quartzo e feldspatos (Figura 78 B).

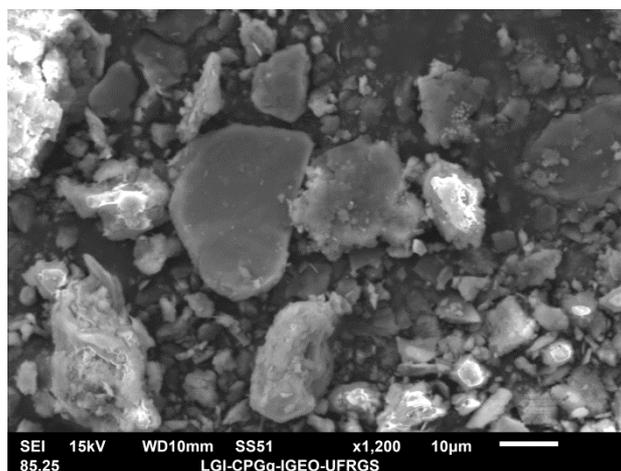


Figura 80 - Aspecto geral da fração inferior a 10 µm .

#### 4.17 Análises por Microsonda Eletrônica

Os dados provenientes desta técnica demonstraram que na fração inferior a 10 micra os argilominerais não apresentavam elementos como zinco, urânio, chumbo, entre outras. Foi verificado que as inclusões pretas e lamelares encontradas em grande parte dos feldspatos e quartzo é composto por ilmenita. Quanto as apatitas, apresentam teores variáveis , porém baixos, de Si, Mg, S, entre outros.

## 5 DISCUSSÕES

Neste trabalho foram analisadas 16 amostras de sedimentos de fundo coletadas ao longo da costa da Namíbia, nas proximidades de Lüderitz e de Walvis Bay.

As amostras apresentaram granulometria fina a muito fina e composições minerais variadas. A mineralogia majoritária é composta por quartzo geralmente anguloso, feldspatos arredondados, apatitas arredondadas e pretas e minerais micáceos. Secundariamente foram identificados titanitas, granadas, epidotos, piroxênios e anfibólios. Por vezes a presença de componentes biológicos, tais como diatomáceas e foraminíferos, compõem majoritariamente a amostra.

Algumas amostras apresentaram características distintas, com a presença abundante de algumas fases minerais (amostra rica em micas, apatitas ou foraminíferos). Interpretou-se que estas características são decorrentes da dinâmica sedimentar costeira, e não da área fonte.

Não foram encontradas na região costeira, em quantidades representativas, as fases minerais de interesse econômico.

### *A dinâmica sedimentar*

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se verificar a ausência de minerais componentes de depósitos economicamente viáveis na região costeira. Tal ausência se dá por um conjunto de fatores físicos e químicos que atuam na região. Os processos de transporte no meio físico, seja via eólica ou fluvial são restritos.

O processo eólico apresenta a limitação de transporte em relação à densidade, tamanho e peso dos grãos disponíveis. Sendo assim, minerais de grande densidade, como óxidos e sulfetos, tem pouca probabilidade de serem transportados, devido à força limitada dos ventos. O mesmo ocorre com grãos de minerais pouco densos, como quartzo, que apresentam tamanho maior de grão, e conseqüentemente maior peso.

Quanto a forma de transporte via aquosa, se tem grande limitação devido a reduzida frequência de enchentes e baixa vazão dos rios além de características do solo. Por mais que os fenômenos de *flash floods* possam carregar consigo sedimentos de granulometria muito elevada, devido a sua força de corrente, tais fenômenos são raros e

esporádicos. Quato às taxas de infiltração e evaporação da região, os rios apresentam diminuição drástica de fluxo no decorrer do seu trajeto, tanto que muitos deles não completam o seu percurso até a costa. Sendo assim, parte do material transportado irá percorrer alguns quilômetros, porém ao sofrerem redução da velocidade do fluxo irão se depositar e muitas vezes permear o solo seco e poroso pelo qual passam. Tal ocorrência pode gerar, ao longo do tempo, depósitos supergênicos, tais como aqueles que existem em algumas localidades da Namíbia.

Barreiras físicas como dunas também atuam diretamente para impedir o transporte dos sedimentos por longas distâncias, visto que grande parte dos rios efêmeros não conseguem transpassar tais estruturas de relevo.

Apesar dos diversos fatores limitantes para o transporte efetivo de sedimentos provenientes do interior da Namíbia, esperava-se encontrar, mesmo que em pequenas quantidades, os minerais de interesse. Tal possibilidade seria viável justamente pelo fato de existirem processos de grande amplitude, como *flash floods*, que poderiam se sobrepor aos agentes limitadores. O fato de que o intemperismo químico na região é quase irrelevante também corroboraria a possibilidade dos sedimentos se manterem relativamente estáveis durante todo o processo de transporte. Tal modo de transporte é totalmente diverso daqueles de locais de clima quente e úmido, como parte do Brasil, pois grande parte do material exposto às intempéries seria rapidamente alterado e sofreria perda de sua estrutura original.

#### ***Variabilidade granulométrica e composicional***

A variabilidade granulométrica do material de estudo é consequência de dois principais parâmetros, a presença do rio Orange e da Corrente de Benguela. Primeiramente se tem a constatação de que grande parte dos sedimentos costeiros da Namíbia é proveniente do Rio Orange. Como visto anteriormente, este rio apresenta a característica de trazer materiais de tamanho reduzido, geralmente areia muito fina. Períodos de maior pluviosidade ao longo do trajeto percorrido pelo rio contribuem para que o fluxo seja acima da média em alguns momentos. Quando tal fenômeno ocorre, o rio tem a capacidade de transportar materiais mais grossos, assim justificando a presença de minerais de dimensões superiores ao tamanho indicado anteriormente. Estes grãos de maior granulometria se apresentam muito bem arredondados e moderadamente esféricos, o que evidencia que o transporte sofrido foi intenso e por distâncias

razoavelmente extensas. Também se considera que a Corrente de Benguela exerce grande influência sobre o material costeiro, transportando-os no sentido de sul-norte, e principalmente os materiais mais finos.

Quanto à variação composicional das amostras, pode-se perceber que amostragens localizadas mais ao Sul apresentam maior diversidade mineralógica. Também foi verificada uma variabilidade nos teores desses minerais. As amostras que apresentam características muito distintas sofrem influência de outros processos costeiros. Tais processos ocasionam maior seleção do material e por vezes acúmulo de alguma espécie específica, como micas. Estas características estão diretamente relacionadas a dinâmica sedimentar costeira, com a ação de ondas, marés e correntes marítimas. A presença de estruturas de relevo ao longo da plataforma imersa, como elevações, pode também exercer influência sobre as correntes de transporte, assim propiciando a seleção de alguns materiais.

#### ***A distribuição de argilominerais***

Os argilominerais identificados na fração inferior a 10 micra confirmam, em grande parte, os resultados descritos por Heine *et al.* (2003). Ilita, muito abundante em toda região costeira, e caulinita, menos abundante, foram identificadas em todas amostras. Porém, neste trabalho, a esmectita é ausente nos sedimentos arenosos, diferentemente da pesquisa de Heine e colaboradores, na qual os autores descrevem a ocorrência abundante da esmectita nos solos costeiros. Tal ausência não foi completamente compreendida, visto que este mineral costuma ser comum em ambientes marinhos. Há ainda a possibilidade de que este material tenha sido transportado para regiões mais ao Norte, devido a Corrente de Benguela, ou para regiões mais profundas da plataforma costeira e talude, por ação de correntes marinhas secundárias.

A esmectita é um dos minerais que apresenta estrutura relativamente aberta à entrada de íons variados, podendo assim ser o mineral no qual íons dissolvidos poderiam se encaixar. A ausência deste mineral e presença de argilominerais não expansíveis faz com que a possibilidade de troca iônica entre o meio aquoso e mineral seja reduzida.

### ***Corrosão dos componentes biológicos***

Os componentes de origem biológica comumente apresentam corrosão de suas carapaças, como evidenciado nas imagens provenientes de MEV destes materiais. Esta corrosão indica que o pH da água é ácido. Tal acidez pode estar relacionada zona de ressurgência da região, que leva para porções mais superficiais águas ácidas presentes abaixo da zona de compensação de carbono. Essa interação, juntamente com a presença significativa de matéria orgânica (até 12 wt%) (Fulano), propicia um ambiente redutor e acidificado.

### ***Forma de ocorrência de apatitas***

As apatitas podem se apresentar em diversas formas nas amostras, porém a sua forma mais peculiar é como colóides semi-esféricos de tonalidade preta. Tal característica se da pela sua formação em ambiente com alta concentração de matéria orgânica. Esta forma de ocorrência é rara e restrita a um curto período de tempo glacial, segundo trabalho de Compton *et al.* (2002). Deve-se ressaltar que a esfericidade deste material não tem qualquer relação com taxas e distância de transporte, mas sim condições de formação autigênica de minerais. A Figura 81 apresenta a estruturação interna deste material, onde se pode ver o crescimento de diversos núcleos e presença de cavidades e fragmentos de materiais como sulfetos e quartzo.

A ocorrência destas apatitas autigênicas não está evidente nos resultados por difratometria de raios X devido a sua estrutura amorfa. Sendo assim, materiais sem estrutura cristalina bem definida não apresentam picos nestas análises, mas sim *bumps*, ou apresentam-se inexistentes de qualquer forma. Análises por microsonda e EDS demonstraram que estas apatitas apresentam teores variados, porém baixos, de materiais como sílica, magnésio e enxofre, assim corroborando para a hipótese de terem sido formadas de forma autigênica, agregando em sua estrutura outros elementos presentes na solução.

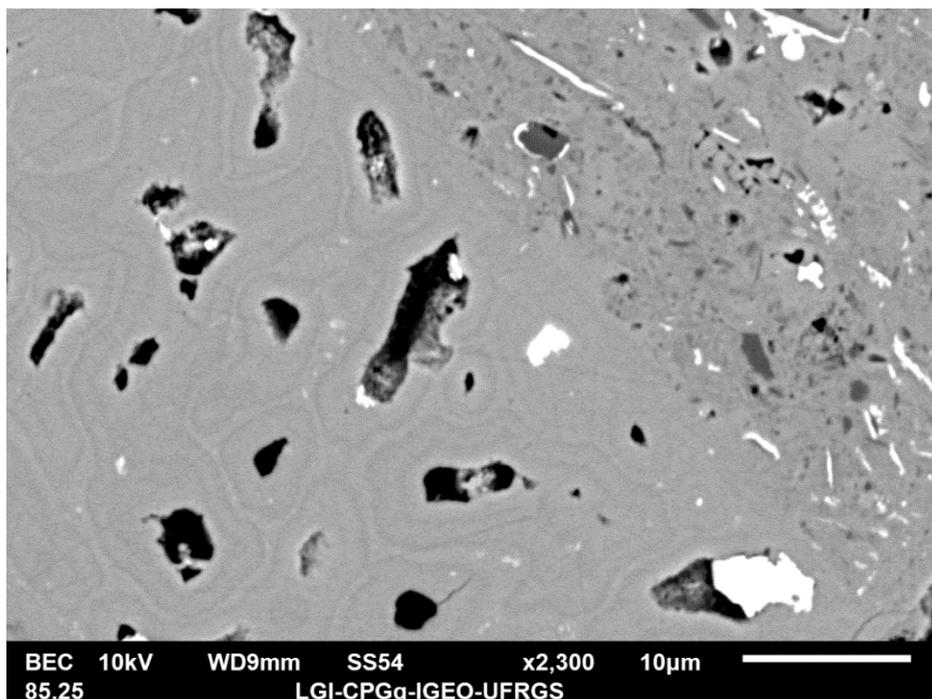


Figura 81 - Padrão de crescimento coloidal em apatita. Grãos de sulfetos em tonalidade branca e cavidades em tonalidade preta.

Estas apatitas, geradas em ambientes ricos em matéria orgânica, apresentam grande afinidade química com íons de urânio que por ventura estivessem dissolvidos em água. Isto se dá por características de Eh, pH e características químicas do urânio (ver próximos itens). Porém, como apresentado no trabalho de, estas apatitas foram geradas em águas sob condições específicas e relativamente incomuns. Sendo assim, sabe-se que estas apatitas não poderiam ser geradas em períodos atuais, visto a falta de condições propícias para tal. A probabilidade de íons de urânio dissolvidos chegarem ao mar era muita baixa. Portanto, no período em que as apatitas estavam sendo formadas e suscetíveis de incorporarem o urânio, este não estava presente. Dessa forma, é totalmente justificável a ausência de urânio na composição das apatitas autigênicas analisadas neste trabalho por microsonda eletrônica.

### *O comportamento dos elementos químicos*

Uma possibilidade para que os elementos de interesse oriundos do continente pudessem, indiretamente, chegar ao oceano seria a partir de dissolução e posterior cristalização ao longo do processo de transporte por meio aquoso. Ao entrar em contato com a água pluvial e ao serem carregados em meio fluvial os materiais como óxidos e sulfetos podem ser dissolvidos devido às características de pH e Eh do meio aquoso em

que estão inseridos. Sabe-se que água fluviais costumam apresentar pH levemente ácido, o que permite o processo de dissolução. Sendo assim, os íons liberados seriam dissolvidos e assim transportados. Poderiam tanto ser adsorvidos por argilas ou matéria orgânica, por exemplo, como permanecer em solução. Nestes casos, se este material chegasse ao mar, iria encontrar condições diferentes, o que poderia ocasionar a formação autigênica, provavelmente em colóides, com outros materiais fragmentados e dissolvidos no meio. Outra possibilidade é a de se manterem dissolvidos na água, sendo assim consumidos por micro e macro organismos presentes na região.

Sabe-se que a especiação elementar é decorrente das condições de Eh e pH da água, portanto a forma na qual os íons elementares ocorrem é um reflexo direto das condições do meio. Dentre os diversos ambientes onde estes materiais podem estar dissolvidos, sabe-se que o oceano apresenta condições de pH mais básico quando comparado com águas fluviais. Também se sabe que a proximidade de centros urbanos, e seus produtos químicos, faz com que as condições mudem, gerando assim águas mais ácidas. A partir disto pode-se dizer que dependendo do elemento a ser analisado, este pode ocorrer em diversas valências, por vezes propiciando a precipitação ou mantendo-se em forma de íons.

### ***O comportamento do urânio***

Tem-se conhecimento de que a Namíbia é um país que apresenta grande diversidade de depósitos e minas de urânio (sétima maior produção mundial), e que este fato tem implicações diretas nas composições do solo e possíveis interações entre o meio mineral e biológico. Portanto, tendo em vista o fato de que os solos apresentam teores altos de urânio (Shimboyo *et al.*, 2016), indaga-se se o urânio ocorre restrito aos solos ou também em meio aquoso. Sabe-se que este elemento apresenta solubilidade relativamente alta em água (valências entre +3 e +6), por vezes é considerado grande demais para entrar na estrutura cristalina de grande parte dos minerais.

Devido à valência na qual este elemento comumente ocorre em águas marinhas, se tem o conhecimento de que em ambientes com pH básico estes íons terão a tendência a formar minerais autigênicos e assim precipitar, visto a baixa solubilidade do urânio nestas águas. Porém, ao localizar-se em águas mais ácidas, sua solubilidade aumenta, assim permanecendo em solução. Ressalta-se que em meio oxidante o urânio encontra-se na valência +6 sob forma do íons uranila  $UO_2^{2+}$ , que é a forma mais estável e mais

móvel. Sendo esta a forma com a qual o urânio é transportado até o mar (Garnier-Laplace *et al.*, 2001).

Tendo em vista esta relação entre especiação e pH, pode-se concluir que as águas nas quais os sedimentos coletados neste trabalho se encontram, são propícias para manter o urânio em solução. Isto se dá pelo fato destas águas conterem teores significativos de matéria orgânica, de poluentes provenientes das cidades litorâneas, de carbonatos (proveniente do *surface upwelling* das águas abaixo da zona de compensação do carbono), e de fósforo (devido aos fosforitos abundantes), sobre as quais os íons de urânio ficam adsorvidos ou livres na coluna d'água. Sendo assim, apesar das águas marinhas apresentarem pH mais básico, a concentração destes elementos na água faz com que uma barreira geoquímica seja formada e propicie um comportamento diferenciado das espécies de urânio e de outros elementos.

## 6 CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho, pode-se concluir que:

- Os sedimentos costeiros da Namíbia apresentam como mineralógica majoritária quartzo (facetado), feldspatos (plagioclásio e k-feldspatos), micas (biotita e muscovita), apatitas (ígneas e autigênicas) e piroxênios. Quanto aos minerais de menor ocorrência, tem-se granada, epidoto, rutilo e ilmenita (inclusões), anfibólios.
- Algumas amostras apresentam grande quantidade de materiais de origem biológica, como dentes, carapaças e escamas.
- Nenhum dos elementos de interesse econômico foi identificado nas amostras estudadas.
- O transporte sedimentar entre regiões interioranas e a costa, por meio eólico e fluvial, é restrito e ineficaz em regiões como a Namíbia.
- A Corrente de Benguela tende a homogeneizar a composição mineralógica da região costeira.
- Existe maior concentração de minerais pesados como zircões e apatitas ígneas nas regiões próximas ao Rio Orange, assim como maior variedade granulométrica e composicional, devido à sua grande vazão.
- Nenhum dos elementos de interesse comercial foram identificados nos argilominerais.
- Embora o urânio esteja presente em minerais como titanita e apatita, não está presente em nenhuma fração mineral estudada. Possivelmente encontra-se dissolvido na água na forma de íon uranila.
- Este trabalho não permitiu identificar correlações entre as atividades de mineração e contaminação dos sedimentos e da biota marinha.

## 7 REFERÊNCIAS

- Alchin, D. J.; Frimmel, H. E.; Jacobs, L. E. 2005. Stratigraphic setting of the metalliferous Rosh Pinah Formation and the Spitzkop and Koivib Suites in the Pan-African Gariep Belt, southwestern Namibia. *South African Journal of Geology*. 108:19-34
- Alchin, D. J.; Moore, J. M. 2005. A review of the Pan-African, Neoproterozoic Rosh Pinah Zn-Pb deposit, southwestern Namibia. *Geological Society of South Africa*.
- Berning, J.; Cook, R.; Hiemstra, S. A.; and Hoffman, U., 1976. The Rossing uranium deposit. *South West Africa: Economic Geology*, v. 71, p. 351-368.
- Bhaskar, J. S.; Parthasarathy G.; Borah, R. R.; Borthakur, R. 2016. Raman and FTIR spectroscopic evaluation of clay minerals and estimation of metal contaminations in natural deposition of surface sediments from Brahmaputra River. *International Journal of Geosciences*. 7:873-883
- Borg, G.; Kärner, K.; Buxton, M.; Armstrong, R.; Merwe, S. W. 2003. Geology of the Skorpion supergene zinc deposit, Southern Namibia. *Economic Geology*. 98:749-771
- Bowel, R. J.; Barnes, A.; Grogan, J.; Dey, M. (1996) Geochemical controls on uranium precipitation in calcrete paleochannel deposits of Namibia Childers, M. O.; Bailey, R. V. 1979. Classification of uranium deposits. *Contributions to Geology*. 17: 187-199
- Bremner, J. M. 1981. Shelf morphology and surficial sediment of central and northern south west Africa (Namibia). *Geo-marine letters*. 1:91-96
- Bühn, B.; Rankin, A. H.; Schneider, J.; Dulski, P. 2002. The nature of orthomagmatic, carbonatitic fluids precipitating REE, Sr-rich fluorite: fluid-inclusion evidence from the Okorusu fluorite deposit, Namibia. *Chemical Geology*. 186:75-98
- Christelis, G.; Struckmeier, W. 2011. Groundwater in Namibia – An explanation to the hydrogeological map. *Geological Survey of Namibia*.
- Compton J. S.; Mulabisana, J.; McMillan, I. K. 2002. Origin and age of phosphorite from the Last Glacial Maximum to Holocene transgressive succession off the Orange River, South Africa. *Marine Geology*. 186:243-261.
- Conde, M.; Kallis, G. 2012. The global uranium rush and its Africa frontier. Effects, reactions and social movements in Namibia. *Global environment Change*. 22: 596-610
- Da Silva, A. L.; De Oliveira, A. H.; Fernandes, M. L. S. 2013. Magnetic separation as a method to assist mineralogical characterization of rocks by X-ray diffraction. *International Nuclear Atlantic Conference*. 24-29
- De Decker, R. H. 1986. The geological setting of diamondiferous deposits on the inner shelf between the Orange River and Wreck Point, Namaqualand. *Bulletin of the Joint Geological Survey/University of Cape Town Marine Geoscience Unit*. 16:258
- Diehl, M. 1993. Rare metal pegmatites of the Cape Cross-Uis pegmatite belt, Namibia: geology, mineralization, rubidium-strontium characteristics and petrogenesis. *Journal of African Earth Sciences*. 17:167-181.

- Eitel, B.; Kadereit, A.; Blümel, W. D.; Hüser, K.; Kromer, B. 2005. The Amspoort Silts, northern Namib Desert (Namibia): formation, age and palaeoclimatic evidence of river-end deposits. *Geomorphology* 64:299–314
- Forrest, M.; Jones, M.; Walker, S. 1997. Namibia: Abundant exploration opportunities. *Mining Journal*. Vol. 329. No. 8450
- Garnier-Laplace, C.; Colle, M, Morelo. Fiche radionucléide de uranium naturelle et environnement. IRSN 2001
- Garzanti, E.; Vermeesch, P.; Andò, S.; Lustrino, M.; Padoan, M.; Vezzoli, G. 2014. Ultra-long distance littoral transport of Orange sand and provenance of the Skeleton Coast Erg (Namibia). *Marine Geology*. 357: 25-36
- Goldstein, J.; Newbury, D.; Joy, D.; Lyman, C.; Echlin, P.; Lifshin, E.; Sawyer, L.; Michael, J. 2007. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Nova Iorque. Springer.
- Goudie, A. S. 2015. Desert landforms in Namibia – A Landsat interpretation. Springer.
- Goudie, A.; Viles, H. 2015. Landscape and Landforms of Namibia. Springer. 164p.
- Hallam, C. D. 1964. The geology of the coastal diamond deposits of Southern Africa. In: Haughton, S.H. (ed.), The geology of some ore deposits in Southern Africa II, Geol. Soc. South Africa, p. 671-728.
- Hartleb, J. W. O. 1987. The Langer Heinrich uranium deposit: Southwest Africa/Namibia. *Ore Geology Reviews*. 3:277-287
- Haynes, F. M. 1984. A geochemical model for sulfide paragenesis and zoning in the Cu-Fe-As-S system (Tsumeb, South West Africa/Namibia). *Chemical Geology*. 47:183-190
- Heine, K., Völkel, J. 2010. Soil clay minerals in Namibia and their significance for the terrestrial and marine past global change research. *African Study Monographs*. 40: 31-50
- Jacob, R. E. 1974. The radioactive mineralization in part of the central Damara Belt, Namibia, and its possible origin. *Atomic Energy Board*. Pin 234, 17pp.
- Jacobson P. J.; Jacobson, K. M.; Seely, M. K. 1995. Ephemeral rivers and their catchments - sustaining people and development in Western Namibia. *Desert Research Foundation of Namibia*. 164p.
- Kennedy, D.C. 1978. Geology of the Otjihase copper deposit South West Africa/Namibia. Unpublished report.
- Kinnaird, J. A.; Ne, P. A. M. 2016. Uranium in Africa. IUGS.
- Krapf, C. B. E. 2003. Ephemeral river systems at the Skeleton Coast, NW Namibia. Doctoral Dissertation, University of Würzburg.

- Krapf, C. B. E.; Stollhofen, H.; Stanistreet, I. G. 2003. Contrasting styles of ephemeral river systems and their interaction with dunes of the Skeleton Coast erg (Namibia). *Quat Int* 104:41–52
- Mendelsohn, J.; Jarvis, A.; Roberts, C.; Robertson, T. 2003. Atlas of Namibia – A portrait of the land and its people. *New Africa Books*. Cape Town, South Africa.
- Moon, B. P.; Selby, M. J. 1983. Rock mass strength and scarp forms in southern Africa. *Geogr Ann* 65A:135–145
- Mvondo, F.; Dauteuil, O.; Guillocheau, F. 2011. The Fish River canyon (southern Namibia): a record of Cenozoic mantle dynamics? *Geoscience* 343:478–485
- Nejeschlebová, L.; Sracek, O.; Mihaljevič, M.; Ettler, V.; Kříbek, B.; Knésl, I.; Vaněk, A.; Penížek, V.; Dolníček, Z.; Mapani, B. 2015. Geochemistry and potential environmental impact of the mine tailings at Rosh Pinah, southern Namibia. *Journal of African Earth Sciences*. 105:17-28.
- Pinch, W. W.; Wilson, W. E. 1977 Minerals: A descriptive list in Tsumeb. *Mineral Rec.* 8:17-37
- Phillips, D.; Harris, J. W. 2009. Diamond provenance studies from  $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  dating of clinopyroxene inclusions: An example from the west coast of Namibia. *Lithos*. 112S:793-805
- Porat, N. 2006. Use of magnetic separation for purifying quartz for luminescence dating. *Ancient TL*. 24:2
- Reed, S. J. B. 2005. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. Cambridge: Cambridge University Press.
- Roesener, H.; Schreuder, C. P. 2005. Mineral resources of Namibia. Nuclear and fossil fuels – Uranium. *Geological Survey of Namibia*
- Rogers, J.; Bremner, J. M. 1991. The Benguela Ecosystem. Part VII. Marine geological aspects. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 29:1-85
- Rogers, J.; Rau, A. J. 2010. Surficial sediments of the wave-dominated Orange River Delta and the adjacent continental margin of south-western Africa. *African Journal of Marine Science*. 28:511-524
- Scientific Communications. 1976. A preliminary account of the Otjihase copper deposit, south west Africa. *Economic Geology*. 71:384-390
- Shimboyo, S.A.; Oyedele, J.A.; Sitoka, S.S. 2016. Soil Radioactivity Levels And Associated Hazards In Selected Towns In Uranium-Rich Western Namibia. *Int. Sci. Technol.* (7):73-84.
- Spivey, M.; Penkethman, A; Culpan, N. 2010. Geology and mineralization of the recently discovered Rössing South uranium deposit, Namibia. *Society of Economic Geologists*. 15:729-746.

Stone, A. E. C.; Thomas, D. S. G.; Viles, H. A. 2010. Late Quaternary palaeohydrological changes in the northern Namib Sand Sea: New chronologies using OSL dating of interdigitated aeolian and water-lain interdune deposits. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*. 288:35-53

Strohbach, B. J. 2008. Mapping the major catchments of Namibia. *Agricola* 18:63-73

Thomas, D. S. G.; Shaw, P. A. 1991. The Kalahari environment. Cambridge University Press, Cambridge.

Vermeesch, P.; Fenton, C.R.; Kober F, Wiggs, G. F.S.; Bristow, C. S.; Xu, S. 2010. Sand residence times of one million years in the Namib Sand Sea from cosmogenic nuclides. *Nature Geosciences* 3:855–862

Youlton, B. 2007. Controls on Uranium Mineralization at the Klein Trekkopje Prospect, Namibia. BSc Honours thesis, University of the Witwatersrand, 63 pp.

Wanke, H.; Wanke, A. 2007. Lithostratigraphy of the Kalahari Group in northeastern Namibia. *Journal African Earth Science*. 48:314–328

White, K.; Walden, J.; Drake, N.; Eckardt, F.; Settlell, J. 1997. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using landsat thematic mapper data. *Remote Sensing Environment*. 62: 30-39

UDEPO database visitado em 06/08/16 às 17h31

(<https://infcis.iaea.org/UDEPO/UDEPOMain.asp?Region=The%20World&Country=Namibia&Type=All&Status=All&Order=1&DepositID=&DepositName=&RPage=1&Page=1&RightP=CountryReport>)

USGS visitado em 14/09/16 às 16h11

([http://mrdata.usgs.gov/mrds/show-mrds.php?dep\\_id=10304790](http://mrdata.usgs.gov/mrds/show-mrds.php?dep_id=10304790))

## **8 APÊNDICE**

### **I - Imagens do aspecto geral das amostras em MEV**

### **II – Imagens dos componentes biológicos da amostra em MEV**

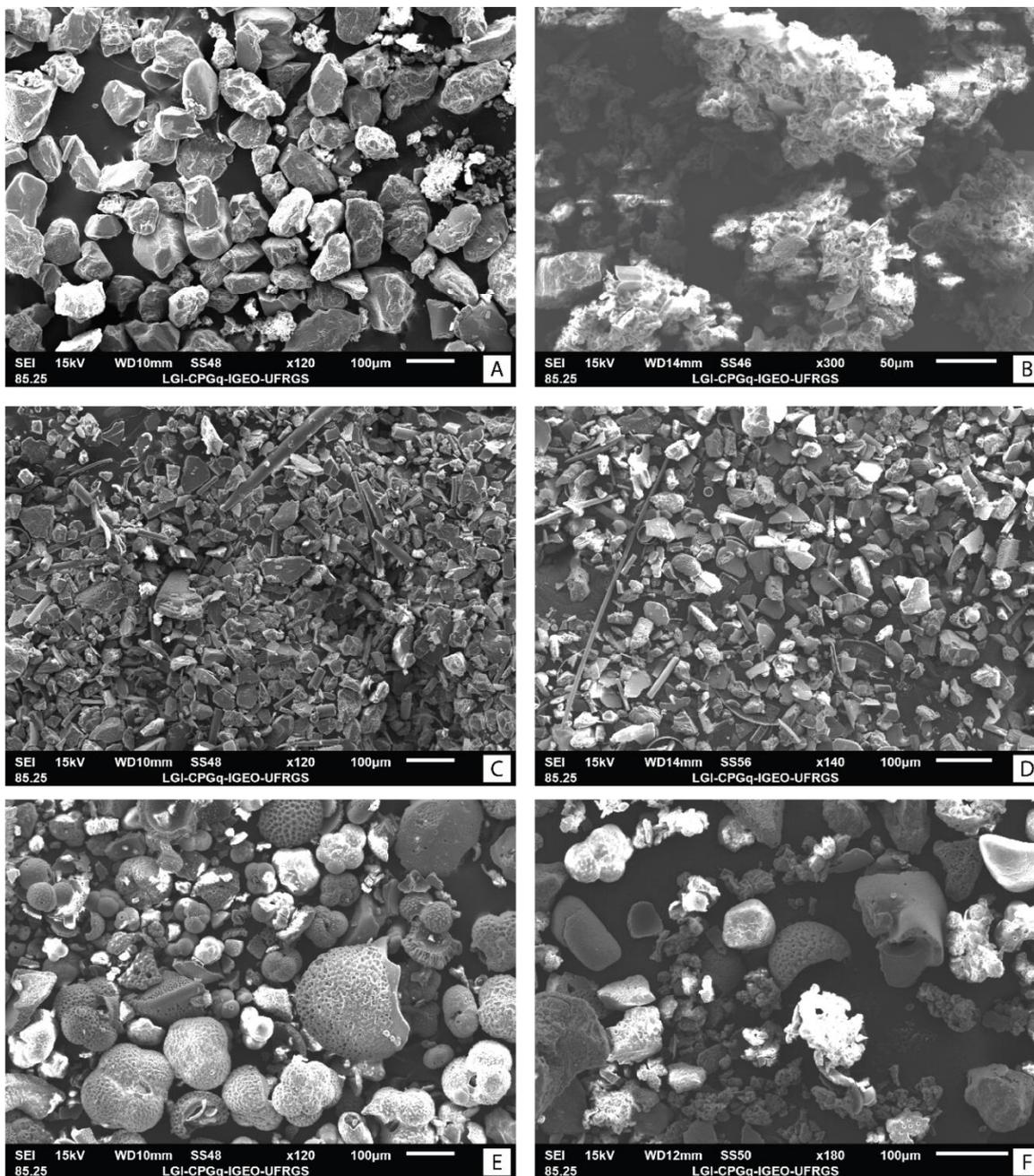
**Foraminíferos bentônicos**

**Foraminíferos plantônicos**

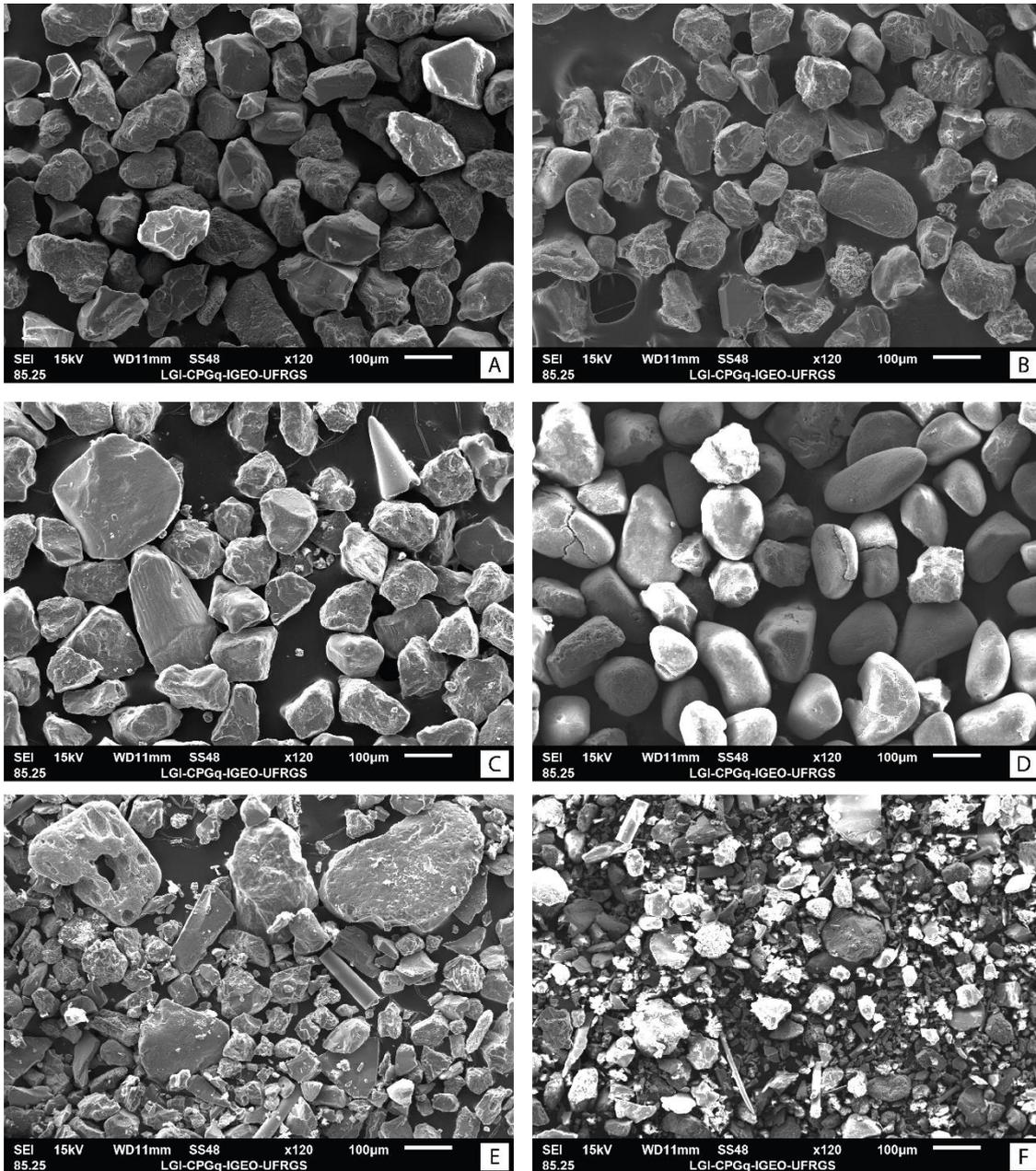
**Diatomáceas**

**Outros componentes**

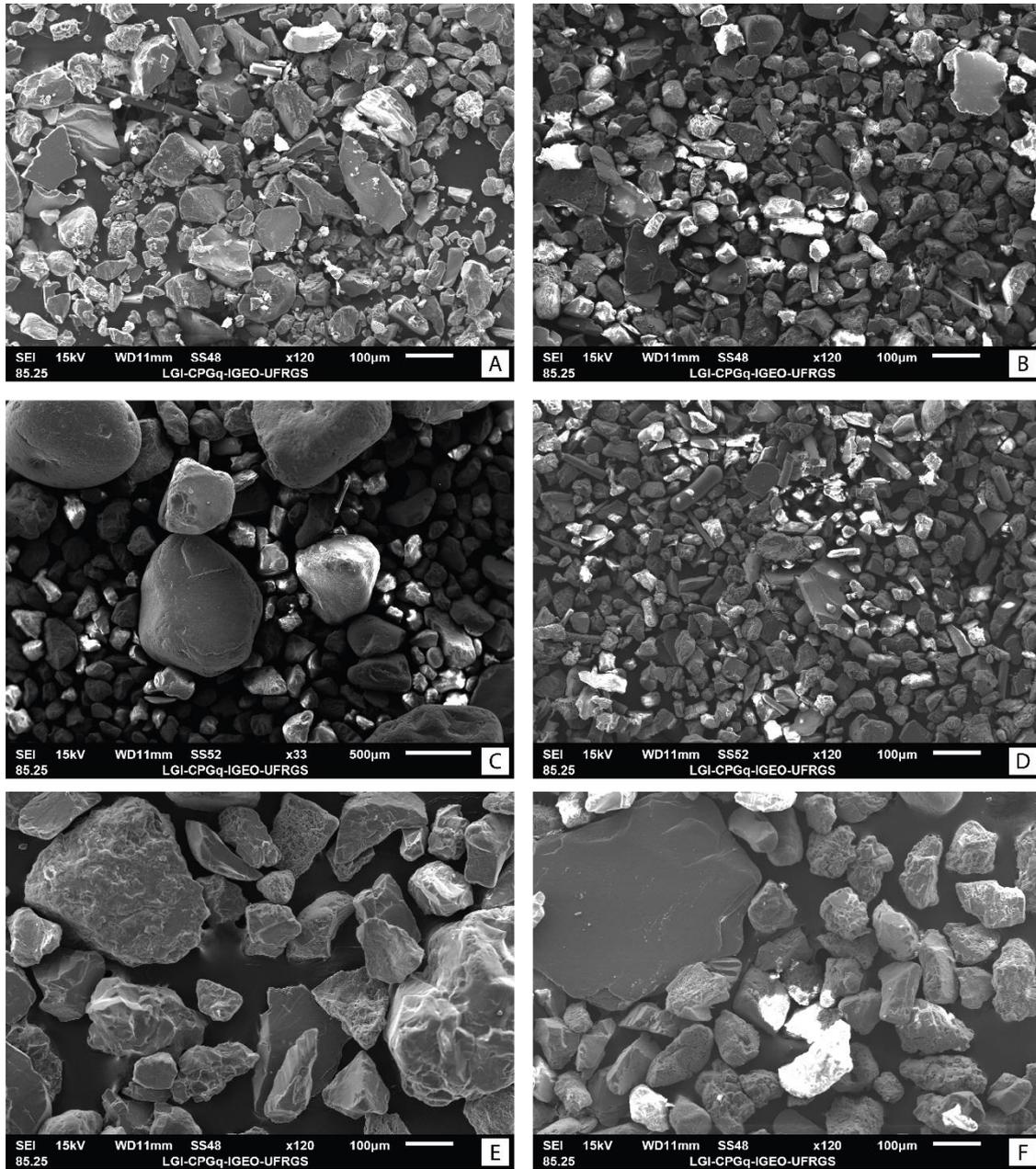
## Apêndice I - Imagens do aspecto geral das amostras em MEV



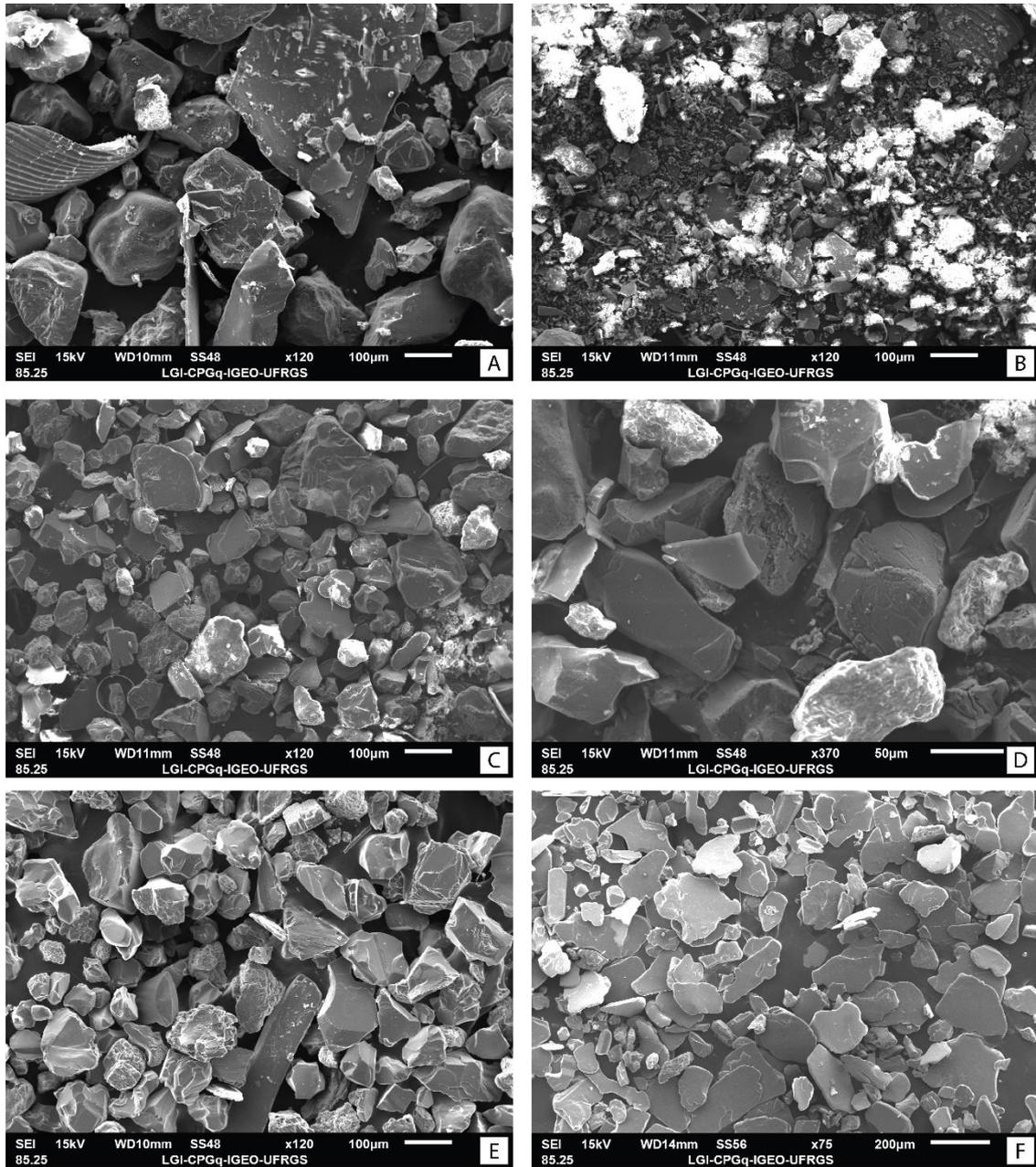
(A) Amostra 20010, com ausência de minerais pesados. (B) Amostra 20010, com presença de minerais pesados e floculados de minerais micáceos. (C) Amostra 26010, com ausência de minerais pesados e presença de espículas de esponjas. (D) Amostra 26010, com presença de minerais pesados e espículas de esponjas. (E) Amostra 23070, com ausência de minerais pesados e alta relação foraminíferos/flocos. (F) Amostra 23070, com presença de minerais pesados e baixa relação foraminíferos/flocos.



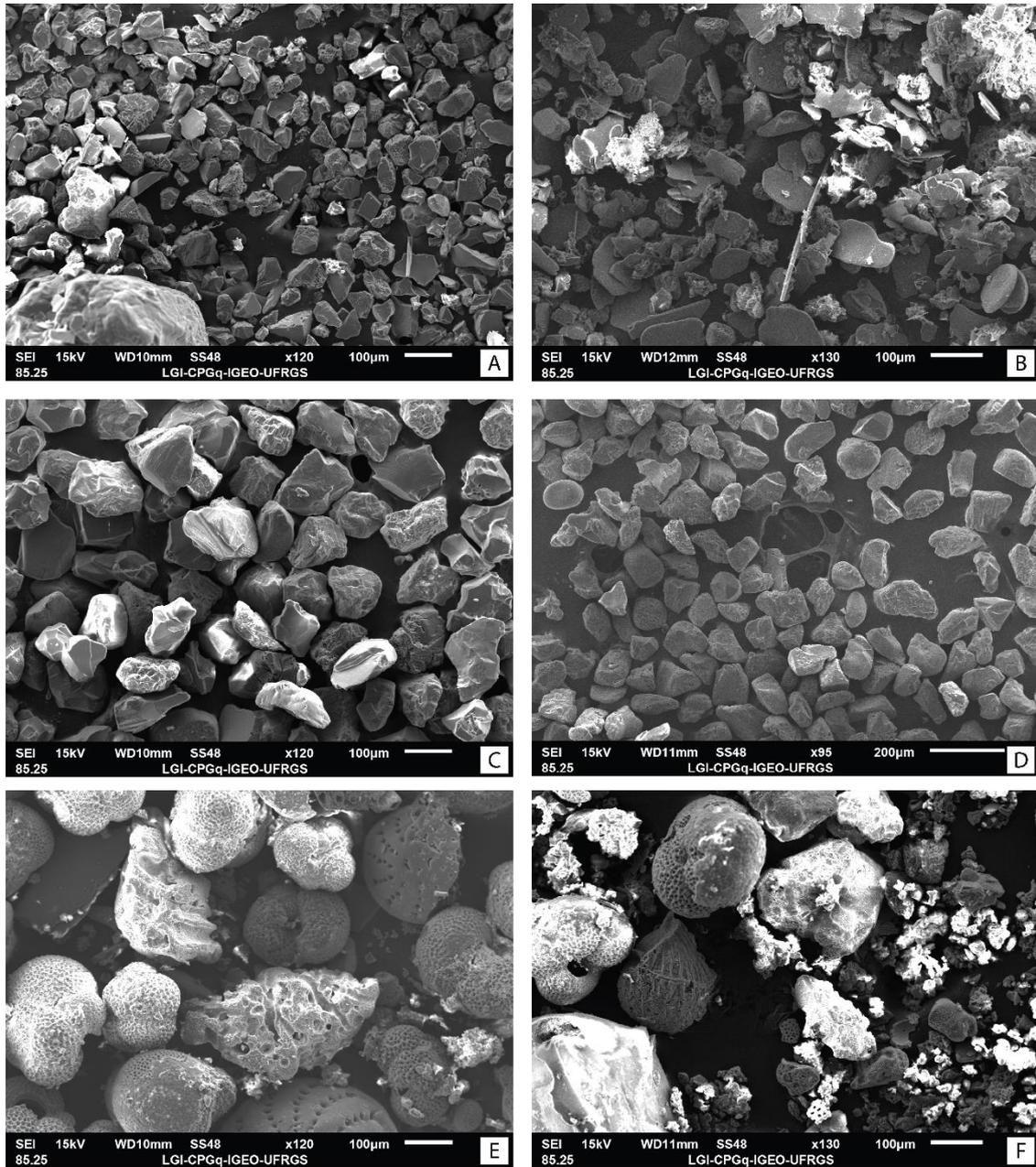
(A) Amostra 26010, com ausência de minerais pesados. (B) Amostra 26010, com presença de minerais pesados. (C) Amostra 26050, com ausência de minerais pesados. (D) Amostra 26050, com presença de minerais pesados e grau de arredondamento de grão muito bom. (E) Amostra LAG, com ausência de minerais pesados e presença de espículas de esponjas. (F) Amostra LAG, com presença de minerais pesados e espículas de esponjas.



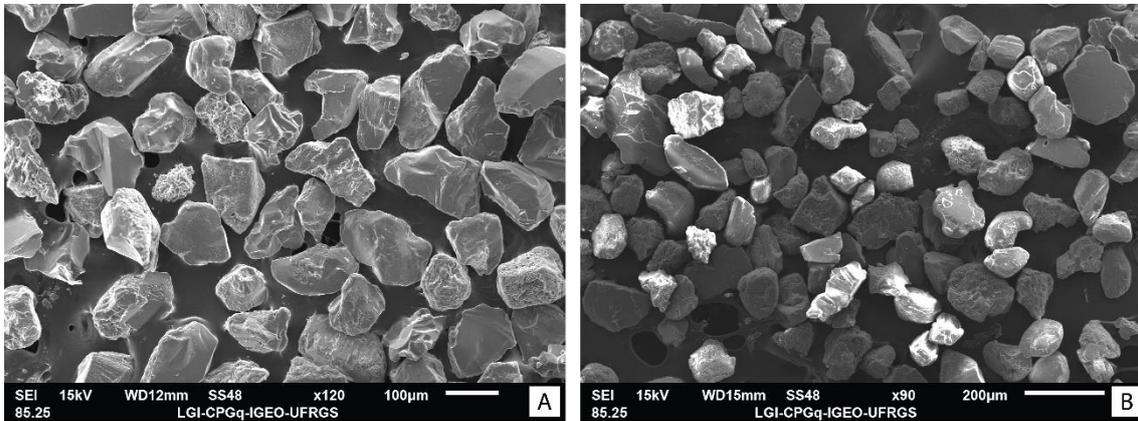
(A) Amostra LUDHC, com ausência de minerais pesados. (B) Amostra LUDHC, com presença de minerais pesados. (C) Amostra LUDH, fração superior a 60 micra. (D) Amostra LUDII, fração inferior a 60 micra. (E) Amostra SWB, com ausência de minerais pesados. (F) Amostra SWB, com presença de minerais pesados.



(A) Amostra WBH, com ausência de minerais pesados e presença de escamas. (B) Amostra WBH, com presença de minerais pesados. (C) Amostra WBHC, amostra mista em menor aumento. (D) Amostra WBHC, amostra mista em maior aumento. (E) Amostra ZZ1, com ausência de minerais pesados. (F) Amostra ZZ1, com presença de minerais pesados e abundância de micáceos.

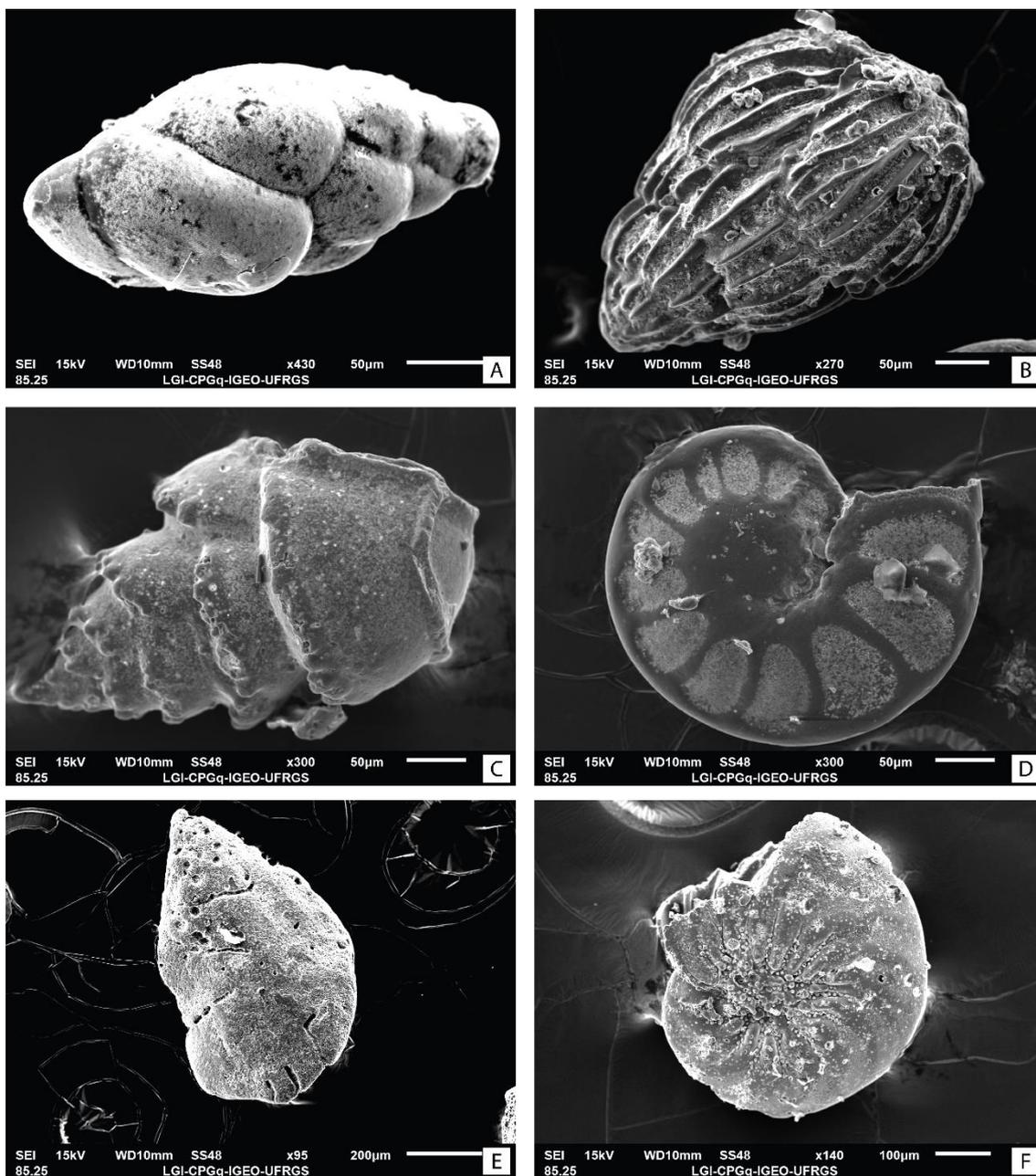


(A) Amostra ZZ3, com ausência de minerais pesados. (B) Amostra ZZ1, com presença de minerais pesados e floculados. (C) Amostra ZZ7, com ausência de minerais pesados. (D) Amostra ZZ7, com presença de minerais pesados. (E) Amostra ZZ8, com ausência de minerais pesados e abundância de componentes biológicos. (F) Amostra ZZ8, com presença de minerais pesados, componentes biológicos e floculados.

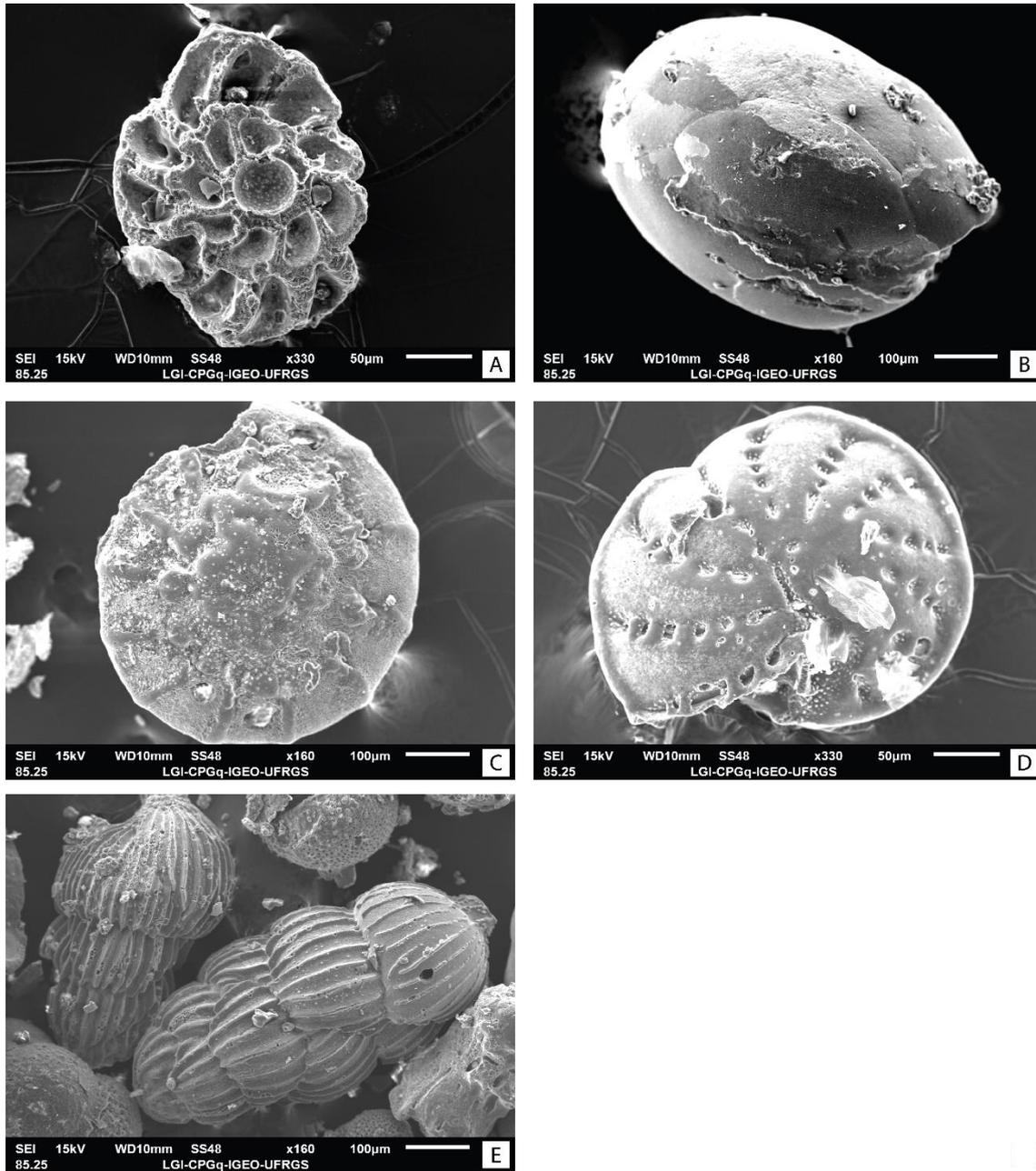


(A) Amostra ZZ9, com ausência de minerais pesados. (B) Amostra ZZ9, com presença de minerais pesados.

Apêndice II – Imagens dos componentes biológicos da amostra em MEV -  
*Foraminíferos bentônicos*

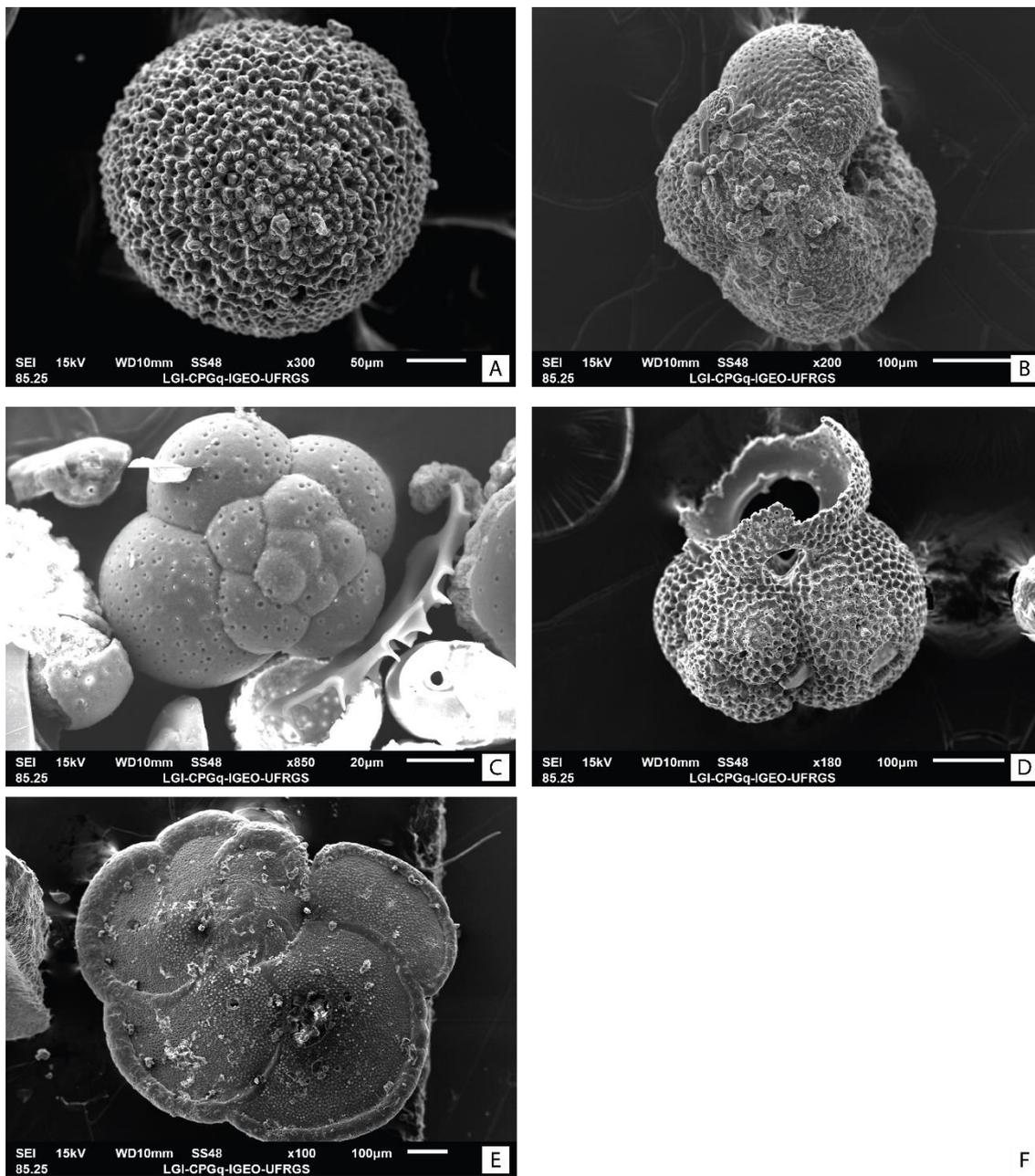


(A) e (D) Foraminífero bentônico de gênero não identificado da amostra 20010. Foraminífero bentônico do gênero *Uvigerina* (B) e *Bulimia* (C) da amostra 23070. (E) Foraminífero bentônico de gênero não identificado da amostra SWB. (F) Foraminífero bentônico do gênero *Ammonia* da amostra ZZ8.

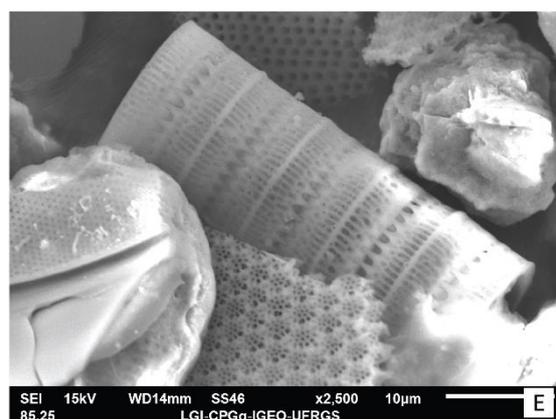
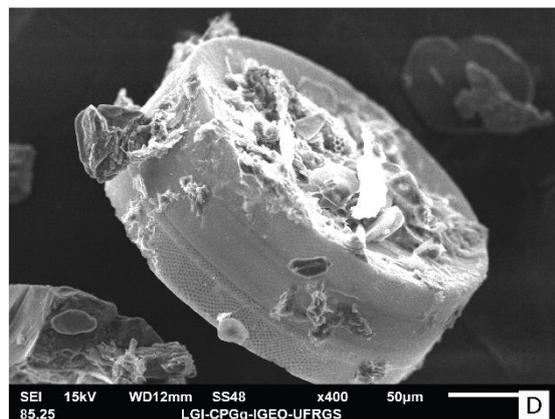
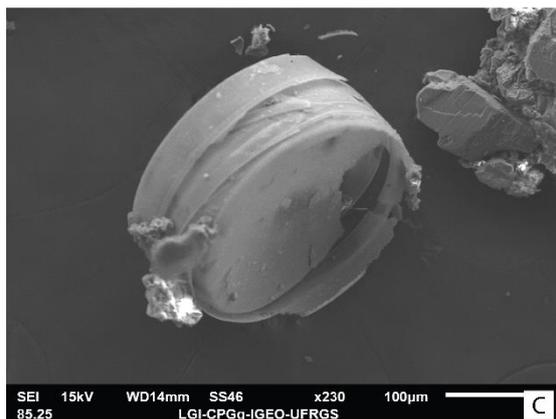
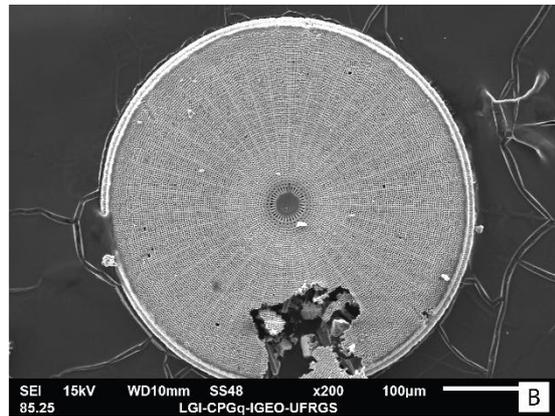
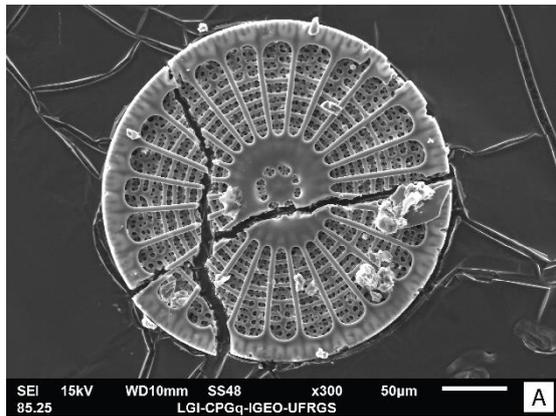


(A) Fragmento de foraminífero bentônico da amostra ZZ8. (B) Foraminífero bentônico do gênero *Miliolidio*. (C) e (D) Foraminíferos bentônicos não identificados da amostra ZZ8. (E) Foraminíferos bentônicos do gênero *Uvigerina* da amostra ZZ8.

*Foraminíferos plantônicos*

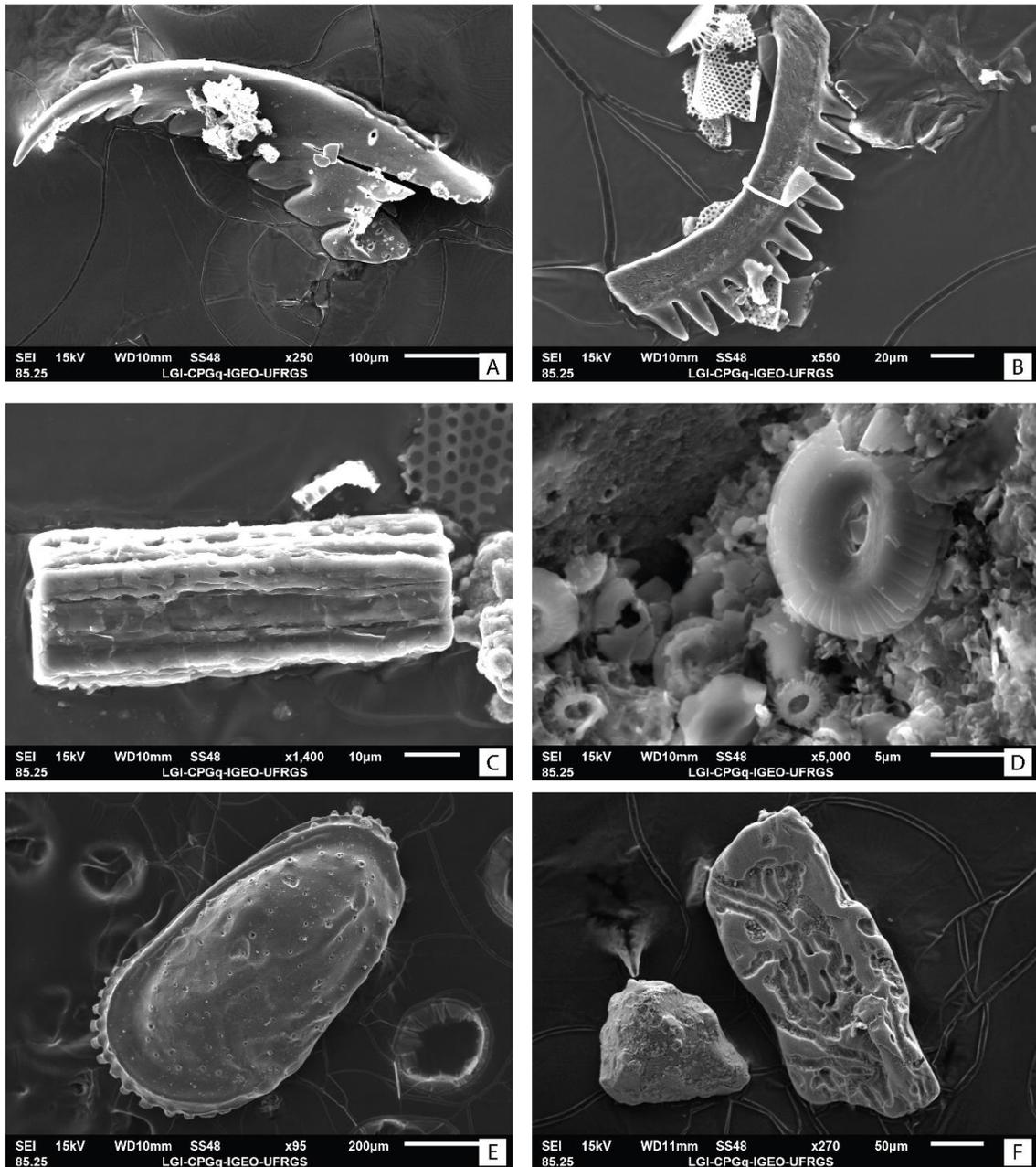


(A) Foraminífero plantônico do gênero *Orbulina* e (B) e (C) *Neogloboquadrina* da amostra 23070. (D) Foraminífero plantônico globuligerínóide (D) e do gênero *Globorotalia* (E) da amostra ZZ8.

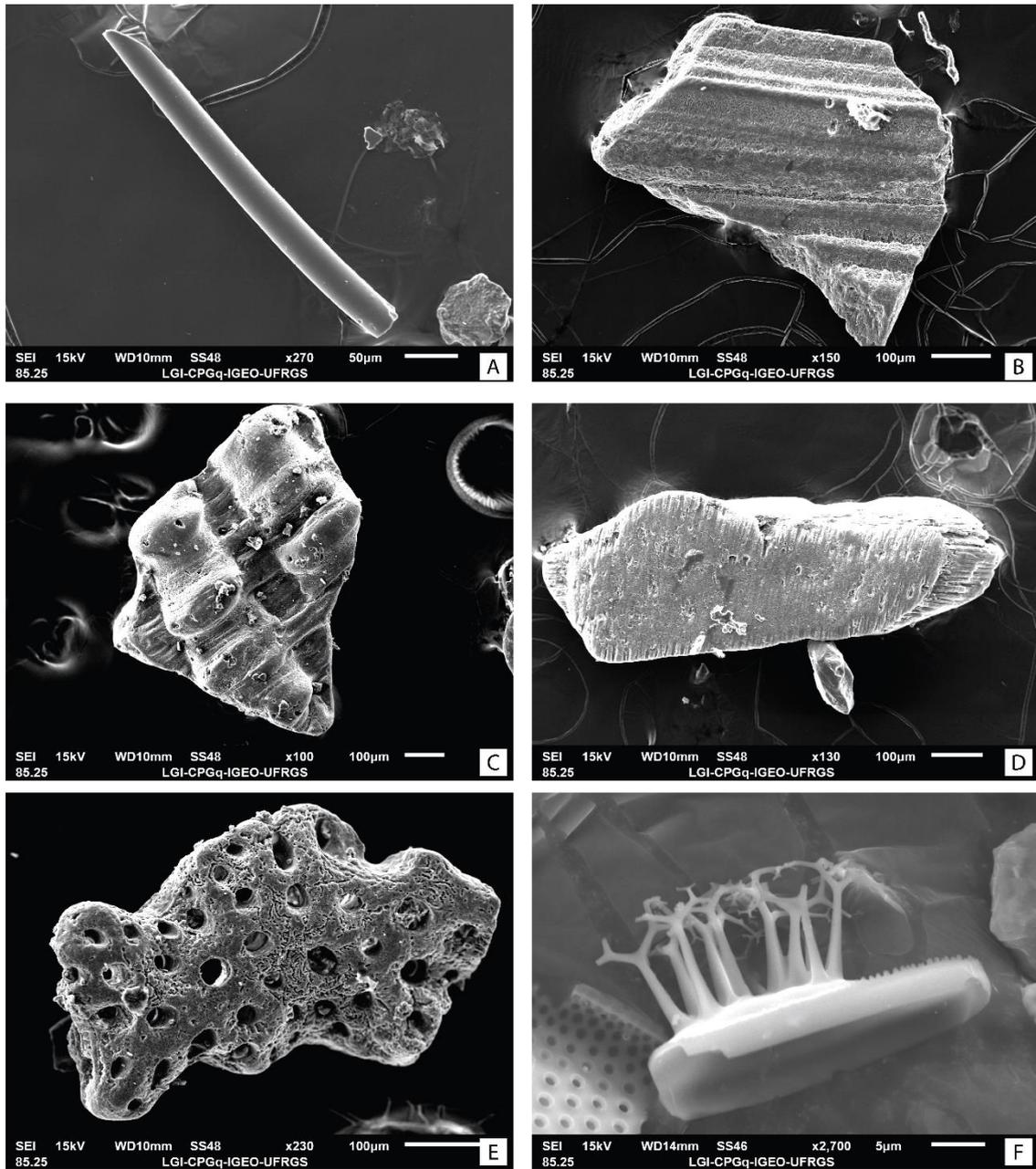
*Diatomáceas*

Diatomáceas da amostra LAG (A) e (B). Diatomácea fragmentada da amostra 20010 (C) e (D), e da amostra 23002 (E).

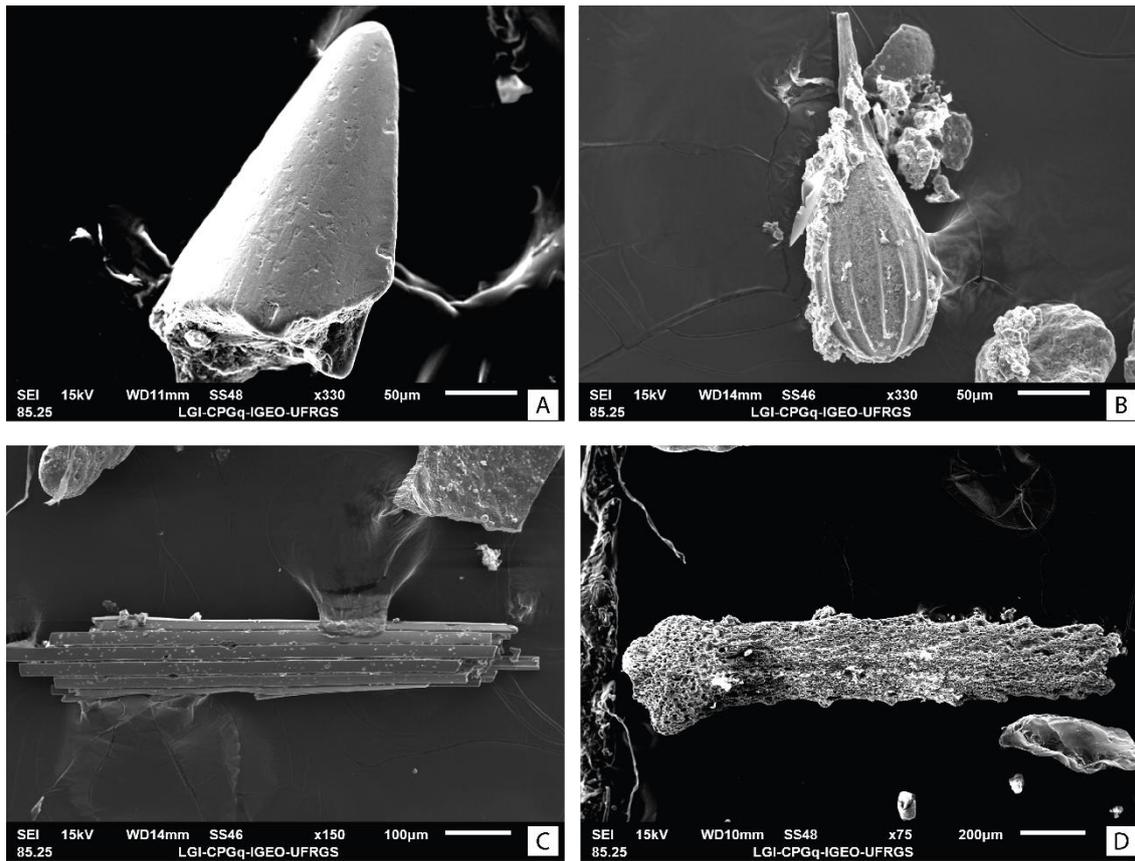
*Outros componentes*



(A) Fragmento de escolocodonte da amostra 20010. (B) Fragmento de rádula de gastrópode da amostra 23070. (C) Espícula de esponja corroída da amostra 23070. (D) Nanofósseis de cocólitos da amostra 23070. (E) Ostracode da amostra 23070. (F) Biocorrção em fragmento de concha de carbonato de cálcio, da amostra 26050.



(A) Espícula de esponja da amostra 23002. Fragmento de concha (B) da amostra SWB e (C) da ZZ8. Padrão de crescimento lamelar-prismático de fragmento de concha da amostra ZZ8 (D). Possível fragmento de *Millepora* (E) da amostra ZZ8. (F) Fragmento de organismo não identificado.



(A) Fragmento de dente de organismo marinho, (B) carapaça de organismo não identificado e (C) fragmento de espinho de equinóide, da amostra 23070. (D) Fragmento de espinho de equinóide corroído, da amostra ZZ8.