



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

**JEFFERSON LIMA DOS SANTOS**

**CONTROLE ESTRUTURAL E FACIOLÓGICO NA ESPELEOGÊNESE EM  
CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA (BACIA POTIGUAR):  
LAJEDO DO ROSÁRIO, MUNICÍPIO DE FELIPE GUERRA – RN**

**FORTALEZA  
2015**

JEFFERSON LIMA DOS SANTOS

CONTROLE ESTRUTURAL E FACIOLÓGICO NA ESPELEOGÊNESE EM  
CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA (BACIA POTIGUAR):  
LAJEDO DO ROSÁRIO, MUNICÍPIO DE FELIPE GUERRA – RN

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

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo

Coorientador: Prof. Dr. António Manuel Álvares Serrão Maurício

FORTALEZA  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S235c Santos, Jefferson Lima dos.

Controle estrutural e faciológico na espeleogênese em calcários da Formação Jandaíra (Bacia Potiguar): lajedo do Rosário, município de Felipe Guerra - RN / Jefferson Lima dos Santos. – 2015.

174 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2015.

Orientação: Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo.

Coorientação: Prof. Dr. Antônio Manuel Álvares Serrão Maurício.

1. Formação Jandaíra. 2. Controle estrutural e faciológico. 3. Espeleogênese. I. Título.

CDD 551

---

JEFFERSON LIMA DOS SANTOS

CONTROLE ESTRUTURAL E FACIOLÓGICO NA ESPELEOGÊNESE EM  
CALCÁRIOS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA (BACIA POTIGUAR):  
LAJEDO DO ROSÁRIO, MUNICÍPIO DE FELIPE GUERRA – RN

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

Aprovado em: 04 / 08 / 2015.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Sebastián Gonzáles Chiozza  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

---

Prof. Dr. Clístenes Batista Teixeira  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Dedico todo o meu esforço para a realização desta etapa de minha vida à minha mãe, que, assumindo também o papel de pai, foi um grande exemplo, e com carinho e dedicação deu-me força para enfrentar as adversidades da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao prof. Dr. Cesar Veríssimo pelos anos de amizade e orientação.

Agradeço à CAPES, FUNCAP E UFC a oportunidade para desenvolver este trabalho.

À todos os professores e colegas do curso de Geologia da Universidade Federal do Ceará FC pelos novos conhecimentos adquiridos, bem como pelo agradável convívio.

À todos os professores e colegas do Centro de Petrologia e Geoquímica do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa Portugal por toda atenção, orientação e receptividade, em especial a(os) professores (as) Dr. António Maurício. Dr. Carlos Figueiredo, Dr. Manuel Francisco e Dr. Orquídia Neves.

Agradeço também ao prof. Joaquim Simão do Departamento de Ciências da Terra da FCT da Universidade Nova de Lisboa por toda ajuda.

Aos colegas do LAGETEC pelo apoio e por deixar meus dias mais divertidos.

À Vanusa e Vânia por me ajudarem e acompanharem durante toda esta jornada.

A minha família pelo apoio e incentivo.

“A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao tamanho original.”

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho corresponde a um estudo geológico e espeleológico no município de Felipe Guerra-RN, onde modelou-se um relevo tipicamente cárstico sobre os calcários da Formação Jandaíra, da Bacia Potiguar. A pesquisa teve como objetivo principal a identificação de fatores que contribuíram para a gênese do complexo de cavernas da região. Em primeiro momento foi realizada análise estrutural baseada em imagens de satélite (digital globe), modelo digital de terreno (SRTM) e mapas geológicos e geomorfológicos existentes. Identificou-se regionalmente que uma série de estruturas desempenharam um grande papel no modelamento geomorfológico da região, destacando-se o recuo da borda sul da bacia, cachoeiras, *canyon* do Rio Apodi-Mossoró e evidenciação de tufas calcárias, bem como o desenvolvimento de feições cársticas. Conforme a análise estatística regional, há maior representatividade para as famílias de lineamentos orientadas para NW-SE (59%) e NE-SW (33%), estas estruturas estão associadas aos Sistemas de Falhas Afonso Bezerra e Carnaubais. Na análise de detalhe no Lajedo do Rosário foram identificadas aproximadamente 3000 estruturas, predominando as orientadas para NW-SE (50%), NE-SW (24%) e N-S (20%). Os intervalos de maiores significâncias, tomando como referência a falha Transtraccional Sinistral NE-SW que secciona o lajedado, indicam que estas se propagaram conforme o sistema cisalhante de Riedel com cinemática sinistral. O histograma comparativo, entre as estruturas regionais e as do Lajedo do Rosário, mostra que suas maiores frequências não são coincidentes, indicando que a maior parte das descontinuidades presentes no lajedado foram originadas por influência de deformações tectônicas locais. A análise do conjunto de cavernas presentes do Lajedo do Rosário aponta que seus desenvolvimentos não se limitam a padrões preferenciais de orientação de estruturas, a importância maior vem do cruzamento das estruturas, principalmente, as de orientação NW-SE, NE-SW e E-W. No segundo momento da pesquisa, a caracterização de estratos carbonáticos do Lajedo do Rosário, baseada em ensaios de índices físicos, compressão uniaxial, desgaste por abrasão, ataque químico, petrografia, análise química e difratometria de raios-x, evidenciou que o nível da caverna Desafio mostrou-se muito resistente em relação aos outros níveis estudados. A alta resistência do nível da caverna está atribuída a sedimentação química (lama carbonática) que originou estrato e ao mineral dolomita em abundância. A ocorrência de cavernas em um extrato tão resistente é explicada pela existência de concentrações de vazios centimétricos originadas pelo processo de dolomitização sofrido pelo estrato na diagênese. Esses vazios, durante a evolução de dissolução no carste, tendem a crescerem e a unirem-se, formando cavernas.

**Palavras-chave:** Formação Jandaíra. Controle estrutural e faciológico. Espeleogênese



## ABSTRACT

This work represents a geological and speleological study in the municipal district of Felipe Guerra in Rio Grande do Norte, which has shaped up a typical karst on limestone of the Jandaíra of the Potiguar basin. The research aimed to identify factors that contributed to the genesis of the complex of caves in the area. At first it was performed a structural analysis based on satellite imagery (digital globe), digital terrain model (SRTM) and existing maps. It was identified that a series of regional structures played a big role in geomorphological modeling of the region, highlighting the retreat from the south rim of the basin, waterfalls, Apodi-Mossoró River canyon and evidenciation of calcareous tufa, and the development of karst features. The regional statistical analysis show there is greater representation for the families of lineaments oriented to NW-SE (59%) and NE-SW (33%), these structures are associated with Afonso Bezerra and Carnaubais systems of faults. In the detail analysis on the Rosario outcrop almost 3,000 structures were identified, predominantly oriented to NW-SE (50%) NE-SW (24%) and NS (20%). The ranges of greater significance, with reference to the sinistral transtracion fault NE-SW that cuts the outcrop, indicates that these structures were propagated as sinistral shear Riedel fractures. The histogram comparison between regional structures and the Rosary outcrop shows that their higher frequencies are not coincident, indicating that most of the discontinuities present in the outcrop have been caused by the influence of local tectonic deformations. The analysis of all of the Rosary outcrop gifts caves shows that their developments are not limited to preferred standards of guidance structures, the most important comes from the intersection of structures, mainly with the orientation NW-SE, NE-SW and E-W. In the second phase of the research, the characterization of carbonate strata of the Rosary outcrop, based on indexes of physical tests, uniaxial compression, wear abrasion, chemical attack, petrography, chemical analysis and diffraction of x-rays showed that the cave Desafio layer was shown to be highly resistant in relation to the other levels studied. The high resistance in the Cave level is attributed to chemical sedimentation (carbonate mud) that originated the layer and the mineral dolomite in abundance. The occurrence of caves in such a tough statement is explained by the existence of centimetrics voids concentrations originated by dolomitization process occurred by diagenesis. These voids during the dissolution of evolution in karst, tend to grow and to unite, forming caves.

**Keyword:** Jandaíra Formation. Structural and faciologic control. Espeleogenesis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.....	4
Figura 2 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar.....	18
Figura 3 – Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar.....	20
Figura 4 – Abertura e evolução do Atlântico Sul.....	22
Figura 5 – Estágios sin-rift II (A) e sin-rift III (B) da Bacia Potiguar.....	23
Figura 6 – Passagem do centro de espalhamento oceânico em frente à Bacia Potiguar, resultado do soerguimento e erosão (A) e início de resfriamento e subsidência da bacia, após passagem do centro de espalhamento (B).....	24
Figura 7 – Compartimentação do litoral entre Ponta do Mel e Ponta dos Três Irmãos, como consequência do par conjugado definido pelo SFC e SFAB.....	27
Figura 8 – Mapa de isópacas da Formação Jandaíra.....	28
Figura 9 – Mapa hipsométrico da área de pesquisa.....	31
Figura 10 – Mapa geológico da área de pesquisa.....	32
Figura 11 – Carstificação na Formação Jandaíra.....	34
Figura 12 – Distribuição da cobertura de rochas carbonáticas na superfície terrestre.....	40
Figura 13 – Regiões Cársticas do Brasil.....	41
Figura 14 – Feições cársticas no município de Felipe Guerra.....	44
Figura 15 – Lajedo do Rosário e a localização das cavidades naturais.....	46
Figura 16 – Cavernas mapeadas no Lajedo do Rosário.....	53
Figura 17 – Mapa de descontinuidades tectono-estruturais da área de pesquisa.....	55
Figura 18 – Seção sísmica mostrando a Falha do Apodi e as falhas sintéticas subsidiárias.....	56
Figura 19 – Evidências em campo da falha transtracional sinistral NE-SW.....	57
Figura 20 – Tufas calcárias associadas a falhamentos.....	58
Figura 21 – Tratamento estatístico dos lineamentos regionais, totalizando 144 estruturas.....	59
Figura 22 – Lineamentos regionais NW-SE e NE-SW.....	62

Figura 23 – Lineamentos regionais E-W e N-S.....	63
Figura 24 – Estruturas cartografadas do Lajedo do Rosário.....	65
Figura 25 – Tratamento estatístico das estruturas do Lajedo do Rosário.....	66
Figura 26 – Diagrama de Riedel com cinemática sinistral.....	67
Figura 27 – Histograma de frequência comparativo das estruturas – Lajedo do Rosário x Regional.....	68
Figura 28 – Estruturas NW-SE do Lajedo do Rosário.....	71
Figura 29 – Estruturas N-S do Lajedo do Rosário.....	72
Figura 30 – Estruturas NE-SW do Lajedo do Rosário.....	73
Figura 31 – Estruturas E-W do Lajedo do Rosário.....	74
Figura 32 – Feições em caverna condicionada por fraturas.....	75
Figura 33 – Orientação das estruturas nas cavernas em diagrama de roseta.....	78
Figura 34 – Profundidades máximas das cavernas e seus níveis equivalentes...	81
Figura 35 – Perfil esquemático do local de coleta das amostras.....	82
Figura 36 – Fotos dos níveis que representam as amostras coletadas.....	82
Figura 37 – Petrografia das amostras S1, S2 e S3.....	84
Figura 38 – Petrografia da amostra I1.....	85
Figura 39 – Petrografia da amostra I2.....	86
Figura 40 – Petrografia da amostra I3.....	86
Figura 41 – Petrografia das amostras D3 e D4.....	87
Figura 42 – Gráficos de densidade aparente e porosidade e absorção d'água...	89
Figura 43 – Gráfico do ensaio de compressão uniaxial.....	91
Figura 44 – Gráfico do ensaio de desgaste por abrasão.....	92
Figura 45 – Histograma de perda de massa após ensaio de ataque químico.....	94
Figura 46 – Amostras em lupa após ataque químico.....	95
Figura 47 – Amostras em MEV após ataque químico.....	96
Figura 48 – Difrátogramas de raios-x das amostras do nível superior.....	100
Figura 49 – Difrátogramas de raios-x das amostras dos níveis intermediários...	101
Figura 50 – Difrátogramas de raios-x das amostras do nível da caverna.....	102
Figura 51 – Porção esponjosa do nível da caverna.....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas da área de pesquisa (DATUM: WGS84; UTM; MC:-39; FUSO: 24S).....	3
Tabela 2 – Classificação de rochas carbonáticas elaborada por Folk (1959 e 1962).....	8
Tabela 3 – Classificação de rochas carbonáticas elaborada por Dunham (1962).	8
Tabela 4 – Classificação de porosidade elaborada por Choquette & Pray (1970).	8
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de índices físicos.....	88
Tabela 6 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial.....	90
Tabela 7 – Resultado do ensaio de desgaste por abrasão.....	92
Tabela 8 – Perda de massa após 2 horas de ensaio de ataque químico.....	93
Tabela 9 – Análise química das amostras.....	98
Tabela 10 – Classificação das rochas carbonáticas em função dos teores MgO....	98

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo principal.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>Localização da área de pesquisa.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Etapa 1 - Compilação de dados.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Etapa 2 - Processamento digital de imagens orbitais e mapas existentes.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Etapa 3 - Trabalhos de Campo.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4</b>	<b>Etapa 4 - Trabalhos laboratoriais.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Petrografia.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Ensaio de caracterização física.....</b>	<b>9</b>
<b>2.4.2.1</b>	<b>Determinação de índices físicos – NBR 15845/2010.....</b>	<b>9</b>
<b>2.4.2.2</b>	<b>Determinação da resistência à compressão uniaxial – NBR 15845/2010.....</b>	<b>9</b>
<b>2.4.2.3</b>	<b>Determinação de desgaste por abrasão – NBR 12042/12.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Ensaio de ataque químico.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Análises químicas e difratometrias de raios-x.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Aspectos Socioeconômicos.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Clima.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3</b>	<b>Vegetação.....</b>	<b>14</b>
<b>3.4</b>	<b>Solos.....</b>	<b>14</b>
<b>3.5</b>	<b>Hidrografia.....</b>	<b>14</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Águas superficiais.....</b>	<b>14</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Águas subterrâneas.....</b>	<b>15</b>
<b>3.6</b>	<b>Geomorfologia.....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>GEOLOGIA REGIONAL.....</b>	<b>16</b>

<b>4.1</b>	<b>Arcabouço Estratigráfico.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Fase Rifte.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Pós-Rifte.....</b>	<b>18</b>
4.1.2.1	Seqüência Transicional (Neo-Aptiana).....	18
4.1.2.2	Seqüência Fluvio-Marinha Transgressiva (Albiano- Campaniano).....	19
4.1.2.3	Seqüência Fluvio-Marinha Regressiva (Neocampaniano-Holoceno).....	19
<b>4.2</b>	<b>Magmatismo.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3</b>	<b>Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Evolução Mesozóica.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Evolução Cenozóica.....</b>	<b>23</b>
<b>4.4</b>	<b>Arcabouço estrutural.....</b>	<b>24</b>
<b>4.5</b>	<b>Formação Jandaira.....</b>	<b>27</b>
<b>4.6</b>	<b>Formação Açú.....</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>GEOLOGIA E GEMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>RELEVO CÁRSTICO.....</b>	<b>35</b>
<b>6.1</b>	<b>Carstogênese.....</b>	<b>35</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Feições Cársticas.....</b>	<b>37</b>
6.1.1.1	Exocarste.....	37
6.1.1.2	Endocarste.....	38
6.1.1.3	Importância do controle tectônico e estrutural.....	39
<b>6.2</b>	<b>Áreas Cársticas.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2.1</b>	<b>No Brasil.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2.2</b>	<b>No Rio Grande do Norte.....</b>	<b>42</b>
6.2.2.1	Município de Felipe Guerra.....	43
6.2.2.1.1	Descrição das cavidades naturais do Lajedo do Rosário.....	47
<b>7</b>	<b>GEOLOGIA ESTRUTURAL.....</b>	<b>54</b>
<b>7.1</b>	<b>Análise das estruturas regionais.....</b>	<b>54</b>
<b>7.2</b>	<b>Análise das estruturas do Lajedo do Rosário.....</b>	<b>64</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Lajedo (superfície).....</b>	<b>64</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Cavidades naturais (subsuperfície).....</b>	<b>75</b>

<b>8</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS CARBONÁTICOS.....</b>	<b>80</b>
<b>8.1</b>	<b>PETROGRAFIA.....</b>	<b>83</b>
<b>8.1.1</b>	<b>Nível superior.....</b>	<b>83</b>
8.1.1.1	Amostras S1, S2 e S3-Biopelsparito/grainstone (Folk,1962/ Dunham,1962).....	83
<b>8.1.2</b>	<b>Níveis intermediários.....</b>	<b>84</b>
8.1.2.1	Amostra I1-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962).....	84
8.1.2.2	Amostra I2-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962).....	85
8.1.2.3	Amostra I3-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962).....	86
<b>8.1.3</b>	<b>Nível da caverna.....</b>	<b>87</b>
8.1.3.1	Amostras D3 e D4-Dismicrita/Carb. Cristalino (Folk,1962/ Dunham,1962).....	87
<b>8.2</b>	<b>Ensaio de índices físicos.....</b>	<b>88</b>
<b>8.3</b>	<b>Ensaio de compressão uniaxial.....</b>	<b>90</b>
<b>8.4</b>	<b>Ensaio de desgaste por abrasão.....</b>	<b>91</b>
<b>8.5</b>	<b>Ensaio de ataque químico.....</b>	<b>92</b>
<b>8.6</b>	<b>Análises químicas.....</b>	<b>97</b>
<b>8.7</b>	<b>Difratometrias de raios-x.....</b>	<b>98</b>
<b>8.8</b>	<b>Discussão acerca dos resultados dos ensaios.....</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXO 1 – MAPAS DAS CAVERNAS MAPEADAS NO LAJEDO DO ROSÁRIO.....</b>	<b>121</b>
	<b>ANEXO 2 – RESULTADOS DETALHADOS DOS ENSAIOS.....</b>	<b>136</b>
	<b>ANEXO 3 – RESULTADOS DETALHADOS DAS DIFRATOMETRIAS DE RAIOS-X.....</b>	<b>142</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

O estado do Rio Grande do Norte expõe uma extensa área aflorante de carbonatos cretáceos pertencentes a Formação Jandaíra. Deformações neotectônicas ocorridas durante a evolução da Bacia Potiguar tornaram estes carbonatos intensamente marcados por estruturas rúpteis. A existência de rochas solúveis e estruturas rúpteis construiu um ambiente propício para a formação de um relevo cárstico na região.

Nos últimos anos diversas pesquisas vêm sendo realizadas na Bacia Potiguar a fim de correlacionar as estruturas tectônicas regionais ao condicionamento da geomorfologia cárstica. Estes trabalhos revelam que a presença das estruturas exerce forte controle na formação de feições cársticas. O resultado dessa influência origina principalmente cavidades incisas e que a confluência destas desenvolve formas do tipo exocársticas como lapiás, dolinas e *canyons* e endocársticas como as cavernas. Destacam-se o predomínio de feições NW-SE, associadas ao sistema de falhas Afonso Bezerra, e de feições NE-SW, associadas ao sistema de falhas Carnaubais (SANTOS, 2010; MOURA-LIMA *et al.*, 2011; SANTOS & CUNHA, 2011; SILVA, 2011; MAIA & BEZERRA, 2012; MAIA, *et al.* 2012; RAMOS NETO, 2012).

A importância desse modelado cárstico no Rio Grande do Norte é atribuída, especialmente, ao elevado potencial cavernícola. Segundo a base de dados gerenciada pelo CECAV (Centro de Estudos, Proteção e Manejo de Cavernas), essa região possui 563 cavidades naturais. Destas 91,5% se desenvolveram nos calcários da Formação Jandaíra. Este dado torna o Rio Grande do Norte o segundo maior estado em número de cavidades naturais conhecidas do nordeste e sétimo do Brasil (CRUZ *et al.*, 2010).

O município de Felipe Guerra possui umas das maiores concentrações de cavidades naturais do estado, sendo contabilizadas 242 unidades, destacando-se a caverna Trapiá, que apresenta extensão superior a 2.000 metros. Somente no afloramento calcário conhecido como Lajedo do Rosário, com área de aproximadamente 1,3 km<sup>2</sup>, estão catalogadas 97 destas cavidades (CECAV, 2013), além de possuir uma superfície intensamente marcada por estruturas rúpteis e feições



cársticas típicas. Devido suas características o Lajedo do Rosário tem despertado o interesse de diversos pesquisadores na área de geologia.

Dada a complexidade da geomorfologia cárstica, há necessidade de um maior direcionamento de pesquisas para estudos de detalhe voltados a carstogênese, não somente relacionados à Geologia Estrutural, mas também, relacionados à análise da faciologia da Formação Jandaíra.

É neste sentido que se enquadra o presente trabalho, que tem como finalidade básica o estudo dos controles geológicos estruturais e litológicos no município de Felipe Guerra, no intuito de elucidar os fatores que influenciaram na gênese do complexo de cavernas da região.

A pesquisa se dá em dois momentos principais, o primeiro é voltado à correlação das estruturas regionais com as discontinuidades presentes no Lajedo do Rosário e nas suas cavernas, o segundo é voltado à busca de agentes carstificadores através trabalhos laboratoriais em estratos carbonáticos do Lajedo do Rosário.

## **1.2 Objetivo principal**

Esse estudo teve como objetivo principal a identificação de fatores que contribuíram para a gênese de cavernas nos calcários cretáceos da Formação Jandaíra no município de Felipe Guerra.

## **1.3 Objetivos específicos**

Para a consolidação desta pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar mapeamento geológico;
- Cartografar o arcabouço estrutural regional;
- Cartografar discontinuidades presentes no Lajedo do Rosário;
- Analisar discontinuidades nas cavernas no Lajedo do Rosário;
- Correlacionar as estruturas regionais com as estruturas do Lajedo do Rosário e das cavernas;

- Realizar caracterização faciológica em estratos carbonáticos do Lajedo do Rosário através de petrografias, ensaios laboratoriais, análises químicas e difratometrias de raios-x.

#### 1.4 Localização da área de pesquisa

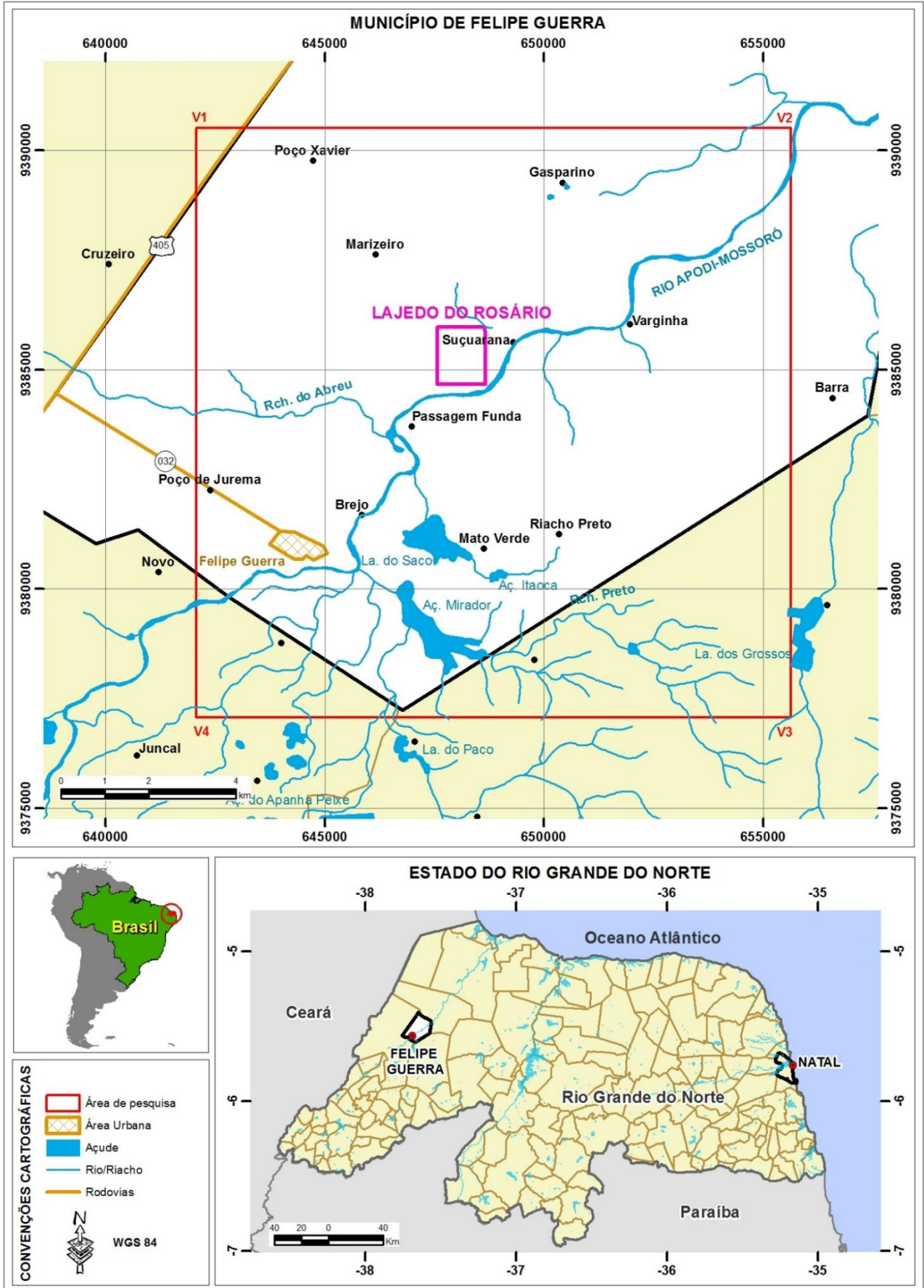
A área de pesquisa está situada no município de Felipe Guerra, no estado do Rio Grande do Norte e compreende uma área de aproximadamente 182km<sup>2</sup>, estando definida pelas coordenadas da Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas da área de pesquisa (DATUM: WGS84; UTM; MC: -39; FUSO: 24S).

VÉRTICES	COORDENADAS UTM	
	Leste	Norte
V1	642.050	9.390.500
V2	655.630	9.390.500
V3	655.630	9.377.090
V4	642.050	9.377.090

O município de Felipe Guerra está inserido na microrregião da Chapada do Apodi limitando-se com os municípios de Apodi (a sudoeste), Caraúbas (a sudeste) e Governador Dix-Sept Rosado (a nordeste). O acesso a sede do município, partindo-se Fortaleza – CE, é feito pela Rodovia Estadual CE-040 até a cidade de Aracati a partir daí, segue-se pela Rodovia Federal BR-304 até a cidade de Mossoró de onde segue-se pela Rodovia Federal BR-405 e por esta, percorrem-se mais 7 km (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: do autor

## 2 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa consistiu basicamente em quatro etapas, que precederam a confecção desta tese, que estão detalhadas a seguir:

### 2.1 Etapa 1 - Compilação de dados

Nesta etapa inicial foi realizado um levantamento bibliográfico relacionado a esta pesquisa, tais como geologia, geologia estrutural, geomorfologia e relevo cárstico. Além disso, buscou-se, mais especificamente, informações acerca da Formação Jandaíra, tectônica regional e carstogênese.

### 2.2 Etapa 2 - Processamento digital de imagens orbitais e mapas existentes

Nesta etapa foram confeccionados mapas que serviram de base cartográfica para a fase de campo. Para tanto, utilizou-se de imagens de satélites Digital Globe (Google Earth), imagens SRTM e mapas do Serviço Geológico do Brasil-CPRM. Todos os produtos cartográficos tiveram como padrão o Datum WGS84 e projeção UTM.

Através das imagens de alta resolução espacial *Digital Globe* (Google Earth) extrairam-se informações planimétricas de drenagens, estradas, açudes e caminhos, bem como exposições de rochas carbonáticas e discontinuidades geológicas. Por meio das Imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) elaborou-se o modelo digital de terreno, que auxiliou na obtenção de informações topográficas, feições de relevo e estruturais. Os mapas geológicos do Rio Grande do Norte (ANGELIM *et al.*, 2006) e da Folha Apodi (GALINDO *et al.*, 2012), elaborados pela CPRM, forneceram informações sobre a geologia e discontinuidades tectônicas de maior porte da região.

### 2.3 Etapa 3 - Trabalhos de Campo

Dentro dos limites da área de estudo foi realizado um mapeamento geológico, principalmente ao longo de afloramentos próximos a borda do *canyon* do Rio Apodi-Mossoró. Foram observados, nos afloramentos, informações sobre as

características litológicas (mineralogia, coloração, textura, etc) e estruturais (identificação e tomada de medidas da orientação espacial da estratificação e de juntas, fraturas e falhas).

## **2.4 Etapa 4 - Trabalhos laboratoriais**

Esta etapa teve como objetivo a caracterização de diferentes níveis carbonáticos através de análises laboratoriais para identificação de agentes carstificadores, que possivelmente influenciaram na gênese de cavernas da região. Para tanto utilizaram-se amostras coletadas no Lajedo do Rosário, nas imediações da caverna Desafio, as quais representam os estratos desde a superfície até o nível de desenvolvimento da caverna. O detalhamento das análises laboratoriais pode ser consultado a seguir:

### **2.4.1 Petrografia**

As amostras foram submetidas a uma apreciação petrográfica a nível macro e microscópico, objetivando uma melhor classificação dos estratos que compõem o lajedo.

As rochas carbonáticas apresentam composição simples, mas com grande variedade textural, sendo diferenciadas pela disposição de elementos ortoquímicos e aloquímicos.

Os elementos ortoquímicos são materiais carbonatados formados por precipitação química direta que não sofreram transporte, ou foram transportados a curtas distancias. Podem ser classificados como micrita ou lama carbonática composta por uma matriz microcristalina e como esparita composta por um mosaico de cristais de carbonato de cálcio agindo como um cimento entre os aloquímicos.

Segundo Folk (1959, 1962) e Dunham (1962), os elementos aloquímicos são grãos carbonatados que sofreram transporte e deposição e podem ser divididos em: intraclastos, oólitos (ou oóides), pisólitos (ou pisóides), oncólitos (ou oncóides), pelóides e bioclastos.

- Os intraclastos são fragmentos de rochas carbonáticas preexistentes, provindos de fontes externas ou da mesma bacia de deposição.

- Os oólitos são pequenas concreções calcárias com diâmetro inferior a 2mm que exibem lâminas concêntricas ao redor de um núcleo (grão de quartzo ou fragmento fossilífero).

- Os pisólitos são concreções oolíticas com diâmetros superiores a 2mm. Tanto os oólitos como os pisólitos, são formados por precipitação química de calcita em torno do núcleo.

- Os oncólitos são concreções formadas por atividades biogênicas sem núcleo individualizado.

- Os pelóides são clastos de calcita microcristalina, de forma subesférica ou elipsoidal, geralmente com tamanhos inferiores a 1mm sem estrutura interna reconhecível formados também pela micritização de outros tipos de grãos aloquímicos. Os pelóides também podem ser interpretados como pelotas fecais de peixes e crustáceos, fossilizados.

- Os bioclastos compreendem todos os fósseis e restos orgânicos que compõem as rochas carbonáticas.

Para a classificação dessas rochas, levou-se em consideração duas classificações importantes: a sugerida por Folk (1959, 1962) que considera a presença de fósseis, pelóides, oóides (incluindo pisóides e oncóides), intraclastos e bioclastos, identificando-os pelos prefixos *bio-*, *pel-*, *oo-* e *intra-*, para definir os principais constituintes (grãos) aloquímicos presentes no arcabouço, bem como o tipo de componente ortoquímico (micrita ou esparita) em que os grãos estão inclusos (Tabela 2); e a classificação elaborada por Dunham (1962) enfatizando a textura da rocha carbonática, especialmente o empacotamento dos grãos aloquímicos e suas relações com a matriz (Tabela 3).

Para a porosidade foi utilizada a classificação proposta por Choquette & Pray (1970). Estes autores dividem a porosidade em três grupos: textura seletiva, textura não seletiva e textura seletiva ou não (Tabela 4).

Tabela 2 - Classificação de rochas carbonáticas elaborada por Folk (1959 e 1962).





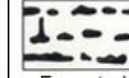










ROCHAS ALOQUÍMICAS (MAIS 10% ALOQUÍMICOS)	Mais de 25% intracristalinos		Menos de 25% intraclastos			
			Mais de 25% oolitos	Menos de 25% oolitos		
			Relação de fósseis e pellets			
			Maior de 3:1	Entre 3:1 - 1:3	Menor de 1:3	
	Mais micrítica que esparítica	INTRAMICRÍTICA	OOMICRITA	BIOMICRITICA	BIOPELMICRITA	PELMICRITA
Mais esparítica que micrítica	INTRAESPARÍTICA	OOESPARITA	BIOESPARITA	BIOPELESPARITA	PELESPARITA	
ROCHAS ORTOQUÍMICAS (MENOS 10% ALOQUÍMICOS)	Aloquímicos entre 1 e 10%				Menos de 1% aloquímicos	
	Aloquímicos mais abundantes				MICRITA DISMICRITA (micrita parcialmente recristalizada a esparita)	
	Intraclastos	Oolitos	Fósseis	Pellets		
	MICRITA C/ INTRACLASTOS	MICRITA C/ OÓLITOS	MICRITA C/ FÓSSEIS	MICRITA C/ PELLETS		

X

Tabela 3 - Classificação de rochas carbonáticas elaborada por Dunham (1962).

Componentes originais não unidos organicamente durante a deposição				Componentes originais organicamente unidos durante a deposição	Textura deposicional não reconhecível
Com matriz micrítica		Sem matriz micrítica			
Suporte de matriz (grãos flotantes)		Suporte de grãos (grãos em contato)			
Menos de 10% aloquímicos	Mais de 10% aloquímicos				
MUDSTONE	WACKSTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE	CARBONATO CRISTALINO

Tabela 4 – Classificação de porosidade elaborada por Choquette &amp; Pray (1970).

TEXTURA SELETIVA						
						
Interpartícula	Intrapartícula	Intercristalina	Móldica	Fenestral	Shelter	Growth framework
TEXTURA NÃO SELETIVA						
						
Fratura	Vugular	Caverna	Canal			
TEXTURA SELETIVA OU NÃO						
						
Brechas	Boring	Burrow	Shrinkage			

## 2.4.2 Ensaios de caracterização física

### 2.4.2.1 Determinação de índices físicos – NBR 15845/2010

Esse ensaio teve como objetivo a determinação dos índices físicos das rochas carbonáticas estudadas, que correspondem à densidade aparente, à porosidade e à absorção d'água. Estes parâmetros expõem as relações básicas entre massa e volume de um determinado tipo de rocha.

Para a realização do ensaio seguiu-se o roteiro estabelecido pela NBR 15845/2010 (ABNT, 2010), na qual são necessários, para cada amostra, 10 (dez) corpos-de-prova com peso variando de 300g a 400g e volume de 125 cm<sup>3</sup>, de dimensões de 5x5x5cm. Os corpos-de-prova, após serragem, foram lavados e colocados em estufa durante 24 horas com temperatura de 110°C. Em seguida, foram pesados individualmente e obtido o **peso seco (A)**.

Após o processo de hidratação, a partir da submersão em água destilada por um período de 24 horas, os corpos-de-prova foram retirados da água, enxutas as suas superfícies, pesados ao ar e obtido o **peso saturado (B)**.

Como passo seguinte, os corpos-de-prova foram novamente pesados, imergidos em recipiente com água, suspensos por um fio de nylon preso sobre a balança e, assim, obtido o **peso submerso (C)**.

Os cálculos foram feitos individualmente para os corpos-de-prova, conforme as fórmulas abaixo, e ao final obtida a média aritmética das medidas.

**Densidade aparente:**  $A / (B - C) = (\text{Kg}/\text{m}^3)$ ;

**Porosidade:**  $((B - A) / (B - C)) \times 100 = (\%)$ ;

**Absorção de água:**  $((B - A) / A) \times 100 = (\%)$ .

### 2.4.2.2 Determinação da resistência à compressão uniaxial – NBR 15845/2010

Este ensaio teve como o objetivo à determinação da tensão de ruptura do material rochoso. A tensão suportada varia de acordo com a composição mineralógica, textura, estado de alteração e porosidade do material.



O roteiro seguiu a NBR 15845/2010 (ABNT, 2010), que exige para cada amostra 5 (cinco) corpos de prova com dimensões de 7x7x7cm, com duas faces bem paralelas, para que a força aplicada atue uniformemente.

Os blocos foram lavados e colocados numa estufa por 24 horas. Após isso, foram retiradas as dimensões de topo (a1) e base do cubo (a2) e calculada a área de face (a1 x a2). Em seguida os corpos-de-prova foram encaminhados para prensa hidráulica para serem submetidos a aplicação da tensão. A carga foi aplicada gradualmente, até o momento da ruptura.

Obtida a carga máxima no qual o bloco foi rompido, calculou-se a tensão de ruptura conforme a fórmula abaixo, e, ao final, foi obtida a média aritmética dos resultados.

$$C = W / A$$

Onde:

C = Tensão de ruptura (MPa);

W = Força de ruptura (KN);

A = Área de carga do corpo-de-prova (m<sup>2</sup>).

#### *2.4.2.3 Determinação de desgaste por abrasão – NBR 12042/12*

Este ensaio tem como objetivo a mensuração da resistência dos materiais à solicitação abrasiva através da verificação na redução de espessura de corpos de prova após um percurso abrasivo de 1000 metros em equipamento apropriado (Amsler), permitindo avaliar a dureza e estado de agregação dos minerais.

O roteiro seguiu a NBR 12042/12 (ABNT, 2012), que exige para cada amostra 2 (dois) corpos-de-prova com dimensões aproximadas de 7x7x3cm e material abrasivo, areia quartzosa nº 50 (grãos com 0,3cm).

Com auxílio de um relógio medidor foram efetuadas as medidas iniciais das 4 faces laterais dos corpos-de-prova. Logo em seguida eles foram fixados à Máquina de Amsler para início da primeira série de rotação correspondente a 250 voltas ou 500m, onde é liberado o material abrasivo (areia quartzosa) com vazão de  $76 \pm 2 \text{ cm}^3/\text{min}$ , permitindo que o material seja submetido a desgaste abrasivo.

Os corpos-de-prova foram retirados da máquina para que fossem efetuadas novas medidas. Em seguida, foram submetidos a uma segunda série de

rotação, de mais 250 voltas (500m), posteriormente limpos e realizadas novas medidas.

Os cálculos foram realizados individualmente para cada corpo-de-prova, de acordo com as fórmulas a seguir:

$$d = a - b;$$

$$e = a - c.$$

Onde:

**a** = altura inicial das quatro faces (mm);

**b** = altura média das 4 faces após 500m (mm);

**c** = altura média das 4 faces após 1000m (mm);

**d** = desgaste médio após 500m (mm);

**e** = desgaste médio das faces após 1000m (mm).

### **2.4.3 Ensaio de ataque químico**

Para a realização desse ensaio confeccionou-se para cada amostra um corpo de prova cubico com 2cm de lado. Estes foram colocados na estufa (a 100° C por 24 horas) para se retirar a umidade e depois pesados em balança analítica.

A partir daí, as amostras foram submetidas ao ataque químico que foi executado da seguinte forma:

- Submersão de cada corpo de prova em 100 ml de HCl (10%) em temperatura ambiente por um período de 2 horas;
- Lavagem dos corpos de prova em água corrente para remover o ácido e os resíduos;
- Secagem das amostras em estufa (a 100° C por 24 horas) para retirar toda umidade e outra vez foram pesados em balança analítica.

Após o ensaio, as amostras foram submetidas a uma apreciação em lupa binocular e em microscópio eletrônico de varredura-MEV no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará-UFC.

#### **2.4.4 Análises químicas e difratometrias de raios-x**

As análises químicas foram realizadas pela empresa Acme Analítica Laboratórios Ltda, em Belo Horizonte-MG. O tratamento analítico envolveu a determinação de elementos maiores, menores e traço por Espectrômetro de Emissão em Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-ES) e Espectrômetro de Massa em Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS).

As análises de difratometria de raios-x, para determinação mineralógica, foram realizadas no Instituto Superior Técnico-IST da Universidade de Lisboa. Para tanto utilizou-se difratômetro de raios-X PANalytical Xpert Pro com goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de ânodo de Cu. Os registros foram obtidos entre 5 e 60° (2 $\theta$ ) e os dados foram analisados no software X'Pert HighScore versão 2.1b e banco de dados PDF do ICDD.

### **3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL**

O município de Felipe Guerra situa-se a Oeste do estado do Rio Grande do Norte e apresenta uma área total de 268,43 Km<sup>2</sup>, equivalente a 0,51% da área estadual. Limita-se com os municípios de Governador Dix-Sept Rosado a leste, Apodi a oeste e Carubas a sul. A sede do município está localizada nas coordenadas geográficas 5°36'09" Sul e 37°41'19" Oeste, distando 351 Km de Natal, capital do estado (IDEMA, 2008).

#### **3.1 Aspectos Socioeconômicos**

Segundo dados do IDEMA (2008), o município de Felipe Guerra possui uma população em torno de 5.680 habitantes, sendo 3.742 residentes no meio urbano e 1.938 no meio rural, com densidade demográfica de 21,16 hab/Km<sup>2</sup>.

Na área educacional, o município possui 21 estabelecimentos de ensino, sendo 20 de ensino médio da Administração Municipal e 01 da Administração Estadual. Da população total, 73,90% são alfabetizados. O município possui 1.432 domicílios permanentes, sendo 883 na área urbana e 549 na área rural e 1.432 abastecidos por água potável, sendo 838 através da rede geral, 239 através de poço ou nascente e 355 por outras fontes. Apenas 05 domicílios estão ligados à rede geral de esgotos. As principais atividades econômicas são: agropecuária, extração de petróleo e gás natural, extrativismo e comércio. Em relação à infra-estrutura, o município possui 01 Hotel e 01 Pousadas, 01 agência bancária e 01 Agência dos Correios, além de 64 estabelecimentos comerciais (IDEMA, 2008).

#### **3.2 Clima**

O clima de Felipe Guerra é classificado em muito quente, com período chuvoso de fevereiro a maio e seco de junho a Janeiro. As precipitações médias variam de 600 a 750 mm anuais e a temperatura oscila entre 21 e 36°C, com média anual em torno de 27°C. A umidade relativa média anual é de 68% (IDEMA, 2008).

### **3.3 Vegetação**

O IDEMA (2008) identifica dois tipos de formação vegetal na região: caatinga hiperxerófila e carnaubal. A caatinga hiperxerófila, conhecida também como caatinga arbustivo-arbórea, caracteriza-se por ser uma vegetação densa e de estrutura irregular, muitas vezes formando moitas e descobrindo parcialmente o solo. Durante a maior parte do período seco permanece sem folhas. Entre outras espécies destacam-se a jurema-preta, mufumbo, faveleiro, marmeleiro, xique-xique e facheiro. Carnaubal é uma vegetação natural onde a espécie predominante é a palmeira ou carnaúba e se distribuem de forma espaçada.

### **3.4 Solos**

Quanto à cobertura pedológica, predomina na região a rendzina e o cambissolo eutrófico (IDEMA, 2008).

As rendzinas são solos alcalinos rasos, moderado à imperfeitamente drenados, derivados do calcário. A marcante presença de fragmentos calcários constitui forte potencial de nutrientes para as plantas.

Os cambissolos eutróficos são caracterizados por serem medianamente profundos a rasos e moderadamente drenados. Apresentam fertilidade média a alta, textura argilosa, boa porosidade e permeabilidade.

### **3.5 Hidrografia**

#### ***3.5.1 Águas superficiais***

O município de Felipe Guerra encontra-se totalmente inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró, que o atravessa na direção SW-NE. Seus principais tributários são: os Rios do Alazão, do Meio, do Abreu e Preto. As principais acumulações de água são: a Barragem Mirador (685.000m<sup>3</sup>/comunitário) e a lagoa do Saco. Todos os cursos d'água são intermitentes e o padrão da drenagem é o dendrítico (IDEMA, 2008).

### **3.5.2 Águas subterrâneas**

Felipe Guerra está inserido no Domínio Hidrogeológico Intersticial e no Domínio Hidrogeológico Cárstico-Fissural. O Domínio Intersticial é composto de rochas sedimentares da Formação Açú e dos Depósitos Aluvionares. O Domínio Cárstico-Fissural é constituído pelos calcários da Formação Jandaira (CPRM, 2005).

Segundo os dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da SIAGAS (2012), o município possui 48 pontos de captação d'água, sendo todos poços tubulares. O uso da água destina-se ao consumo doméstico primário (consumo humano para beber) e secundário (consumo humano para uso geral), agrícola, animal e outros usos.

### **3.6 Geomorfologia**

O município de Felipe Guerra está inserida, geomorfologicamente, na Chapada do Apodi. Esta unidade é caracterizada por constituir um relevo plano a suavemente ondulado, com cotas de 10 a 150 m de altitude, aumentando gradativamente do litoral para o interior com declividade dominante menor que 2%. Este relevo monótono possui alguns vales abertos, de direção principal NNE-SSW, correspondendo a lineamentos estruturais do embasamento cristalino e vales de menor expressão com orientação aproximada N-S. A drenagem raramente se adensa devido à grande permeabilidade das rochas calcárias (PROASNE, 2006).

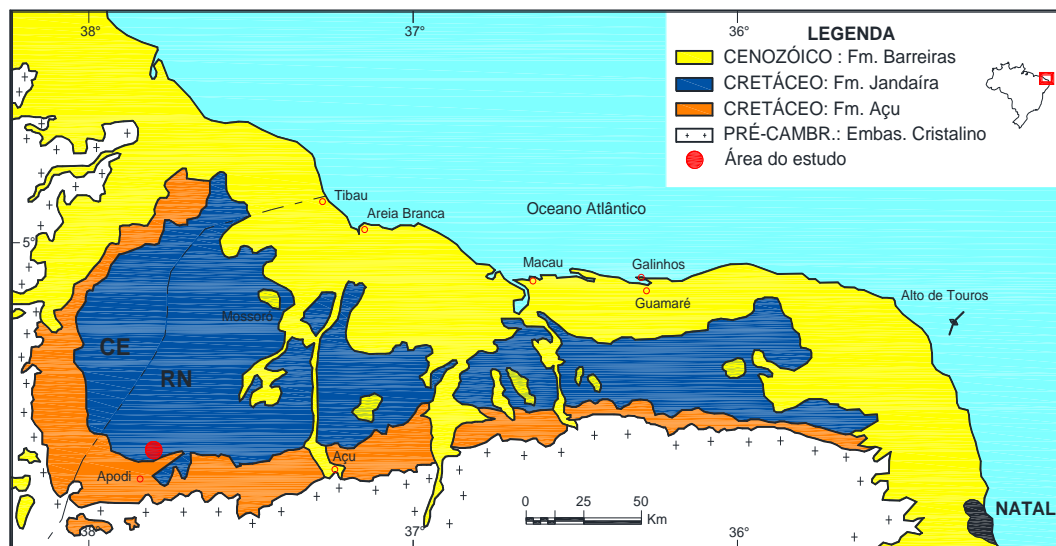
## 4 GEOLOGIA REGIONAL

A área em questão está inserida no contexto geológico da Bacia Potiguar (Figura 2). Localizando-se no nordeste do Brasil, abrange parte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará e suas respectivas plataformas continentais.

A Bacia Potiguar está implantada na Província Borborema de Almeida *et al.*, (1977), limitando-se ao sul e oeste com o embasamento cristalino e a norte e leste com o oceano Atlântico. A bacia abrange aproximadamente 48.000 Km<sup>2</sup>, ocupando uma região de transição entre o continente e oceano, com porção emersa de 21.500 Km<sup>2</sup> e submersa 26.500 Km<sup>2</sup>, estendendo-se até a isobata - 2000.

Segundo Neves (1987), a Bacia Potiguar representa um *rift* intracontinental em sua porção emersa e uma bacia do tipo *pull-apart* em sua porção submersa. Esta bacia classificada como do tipo sedimentar foi originada pela fragmentação do supercontinente Gondwana no início do Jurássico Superior, estando sua origem diretamente ligada à formação do Atlântico Sul (FRANÇOLIN & SZATMARI, 1987).

Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar.



Fonte: Dantas (1998).

### 4.1 Arcabouço Estratigráfico

Segundo proposta de Araripe e Feijó (1994) a Bacia Potiguar está dividida em três unidades: Grupo Areia Branca, Grupo Apodi e Grupo Agulha. O Grupo Areia Branca constitui a sucessão basal, de caráter siliciclástico, composto pelas formações

Pendência, Pescada e Alagamar. O Grupo Apodi inclui as formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra, formados por sedimentos siliciclásticos e carbonáticos. O Grupo Agulha engloba as formações Ubarana, Guamaré e Tibau, compostas por rochas sedimentares clásticas depositadas sob ambiente de alta e baixa energia.

A Formação Pendência com idade Barresiana, é constituída por sedimentos vulcanoclásticos contemporâneos aos siliciclásticos passando por arenitos finos, argilosos, intercalados com siltitos e folhelhos ricos em matéria orgânica. Estes sedimentos foram depositados em ambiente lacustre associado a deltas prográdantes e planícies aluviais (DELLA FÁVERA, 2001). A Formação Pescada com idade Eoaptiana, é representada por uma cunha siliciclástica sintectônica, constituída por arenitos médios com intercalações de folhelhos e siltitos, depositados como leques aluviais coalescentes e sistemas flúvio-deltáicos, de forma local, com pelitos e turbiditos dispersos. A Formação Alagamar é composta pelos membros Upanema e Galinhos, separados por uma seção pelítica informalmente denominada Camada Ponta do Tubarão. O Membro Upanema é basal e composto por arenitos flúvio-deltáicos, intercalados à calcários e folhelhos. As Camadas Ponta do Tubarão são formadas por folhelhos pretos e calciludito ostracoidal em sistema lagunar. O Membro Galinhos é predominantemente pelítico, com folhelhos e calcilutitos (ARARIPE & FEIJÓ, 1994).

A Formação Açú caracteriza-se por uma seção superior de arenitos finos intercalados com folhelhos e uma seção inferior mais espessa, composta por conglomerados e arenitos com delgadas intercalações de folhelhos (SOUZA, 1982). Segundo Araripe & Feijó (1994), esta formação tem seu contato inferior discordante com a Formação Alagamar, estando sotoposta concordantemente à Formação Jandaíra e interdigitada lateralmente com as formações Ponta de Mel e Quebradas. A Formação Ponta do Mel constituída por calcarenitos oolíticos, calcilutitos e dolomitos intercalados por folhelhos de idade Eoalbiana a Mesoalbiana (DIAS-BRITO, 1985). Seus litótipos encontram-se recobertos discordantemente pela Formação Quebradas. A Formação Quebradas locada entre as formações Ponta do Mel (inferior) e Jandaíra (superior), foi subdividida em dois membros: o Membro Redonda, com intercalações de arenitos, folhelhos e siltitos, e o Membro Porto do Manguê representado por folhelhos e, subordinadamente, arenitos. A Formação Jandaíra é composta por calcarenitos bioclásticos e calcilutitos, possui contato inferior



concordante com a Formação Açú ou Formação Quebradas e ocorre localmente interdigitado com a porção inferior da Formação Ubarana.

A Formação Ubarana é constituída por folhelhos e argilitos, entremeados por camadas delgadas de arenitos, siltitos e folhelhos, interdigitadas em direção ao continente com rochas do Grupo Apodi e da Formação Guamaré. A Formação Guamaré é formada por calcarenitos e calcilutitos de plataforma e taludes carbonáticos, apresentando contatos laterais com as Formações Tibau em direção ao continente e Ubarana em direção ao mar. A Formação Tibau é composta por arenitos calcíferos grossos por vezes interdigitados lateralmente com rochas das formações Guamaré e Barreiras (ARARIPE & FEIJÓ, 1994).

Segundo Araripe & Feijo (1994), a formação da Bacia Potiguar é dividida em 2 estágios evolutivos, detalhados a seguir:

#### **4.1.1 Fase Rifte**

Esta fase é marcada por um regime tectônico distensional, com subsidência crustal, que é representada por sedimentos da Formação Pendência, de idade Neocominiana e Eoaptiana (Cretáceo inferior). Estes sedimentos podem atingir espessuras de 6000 m, tendo contato inferior com o embasamento cristalino e contato superior na porção emersa com a Formação Alagamar e submersa com a Formação Pescada.

#### **4.1.2 Pós-Rifte**

Esta fase iniciou-se no Albiano e é subdividida em três seqüências, citadas a seguir:

##### **4.1.2.1 Seqüência Transicional (Neo-Aptiana)**

Esta seqüência caracterizada por um período de poucas atividades tectônicas, marcada por subsidência termal lenta e generalizada, devido ao processo de resfriamento da placa litosférica, aquecida anteriormente na fase rifte.

Este estágio é representado por sedimentos da Formação Alagamar, com espessura média de 800m, tendo contato basal variando entre embasamento

cristalino, Formação Pendência e Formação Pescada, e o contato superior com a Formação Açú na porção emersa e com a Formação Ubarana na porção submersa da bacia.

#### *4.1.2.2 Seqüência Fluvio-Marinha Transgressiva (Albiano- Campaniano)*

A Seqüência transgressiva é formada por uma sedimentação desde sistemas fluviais até ambiente marinho profundo, passando por plataforma carbonática. Esta fase teve início com a deposição da Formação Açú. Em direção ao mar grada lateralmente para as formações Ponta do Mel e Ubarana.

O apogeu desta transgressão foi caracterizado pelo afogamento dos sistemas fluviais da Formação Açú e pela implantação da ampla plataforma carbonática da Formação Jandaíra durante o Turoniano ao Campaniano, onde atingiu a espessura máxima de 650 m.

#### *4.1.2.3 Seqüência Fluvio-Marinha Regressiva (Neocampaniano-Holoceno)*

O registro sedimentar desta grande regressão na bacia é constituído por sistemas de leques costeiros, plataforma e talude, depositados entre o Neocampaniano e o Holoceno, representados, respectivamente, pelo Grupo Barreiras e formações Tibau/Guamaré e Ubarana. A deposição dessa seqüência iniciou-se após forte evento erosivo associada à passagem de um centro de espalhamento de cadeia meso-oceânica na margem equatorial, em frente à bacia ou induzido termicamente pela presença de uma pluma mantélica.

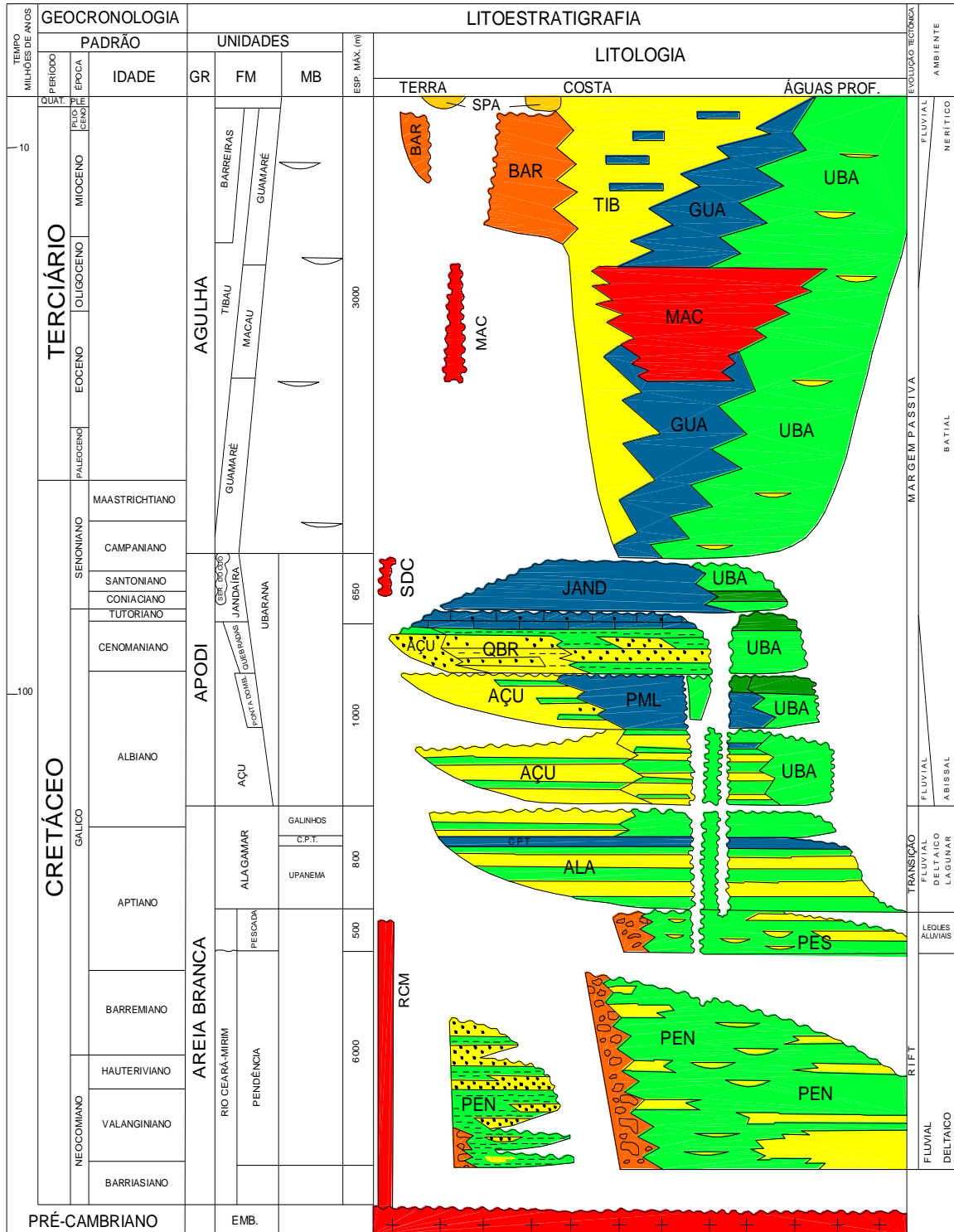
## **4.2 Magmatismo**

A história tectônica da bacia é marcada por três eventos magmáticos, reconhecidos como Formações Rio Ceará Mirim, Serra do Cuó e Macau.

A Formação Rio Ceará Mirim (Jurássico à Cretáceo Inferior) é representada por diques de diabásio toleíticos com forte orientação E-W, na borda Sul da Bacia Potiguar e está relacionada à sua gênese. A Formação Serra do Cuó (Santoniano à Campaniano) é representada por diques de diabásio com tendência alcalina, ocorrendo intercalados a Formação Açú na porção centro-sul da bacia.

A Formação Macau (Terciário) corresponde aos derrames de olivina-basalto que ocorrem intercalados às rochas das Formações Tibau, Guamaré e Ubarana. Estes derrames podem atingir espessura de até 1.500 m, evidenciando assim sua grande expressão e intensidade.

Figura 3 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar.



Fonte: ARARIPE & FEIJÓ (1994).

### **4.3 Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia**

#### **4.3.1 Evolução Mesozóica**

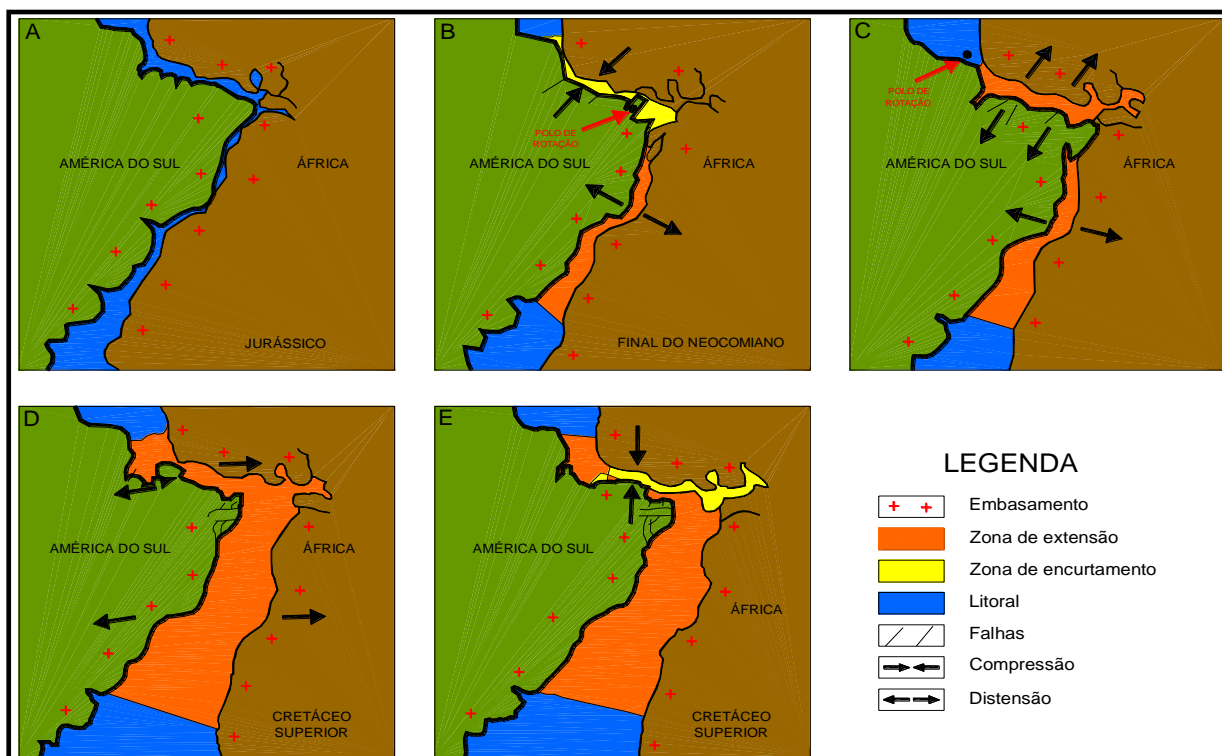
Há dois modelos mais aceitos que descrevem a origem da Bacia Potiguar. O primeiro, proposto por Françolin & Szatmari (1987), sugere uma rotação horária na placa sul-americana em relação à africana, em torno de um pólo localizado próximo a cidade Lavras de Mangabeira- CE, para explicar a separação America do Sul-Africa, envolvendo esforços compressivos e distensivos. O segundo, defendido por Matos (1992), sugere dois estágios principais de geração da Bacia Potiguar, ambos distensivos.

Françolin & Szatmari (1987) propuseram que as primeiras manifestações da separação do supercontinente Gondwana ocorreram no Jurássico Superior com movimentação divergente leste-oeste. Esta movimentação possibilitou a implantação de uma mega fratura que iniciou no sul do continente e progressivamente alastrou-se em direção ao norte.

No Cretáceo inferior a movimentação divergente nos dois continentes era maior a sul causando, desta forma, uma rotação horária na placa sul-americana em relação à africana. Como resultado instalou-se um processo de compressão norte e distensão sul. No Neocomiano, a Bacia Potiguar esteve submetida a esforços compressivos, caracterizados pela ausência de deposição sedimentar. Esses esforços resultaram na formação e reativação de falhas extensionais de direção E-W, originando os grabens da porção submersa da bacia.

No Apdiano, o continente Sul-Americano sofreu um movimento rotacional destrógiro, em relação à África, isto é, uma transcorrência lateral dextral da margem equatorial brasileira. Ao termino do rifteamento ao longo da margem equatorial diminuiu a resistência da litosfera entre a América do Sul e África o suficiente para que se iniciasse o movimento distensivo da America do Sul a Oeste em relação à África. Após o Campaniano, uma compressão N-S afetou as bacias do Ceará e Barreirinhas (Figura 4).

Figura 4 - Abertura e evolução do Atlântico Sul.

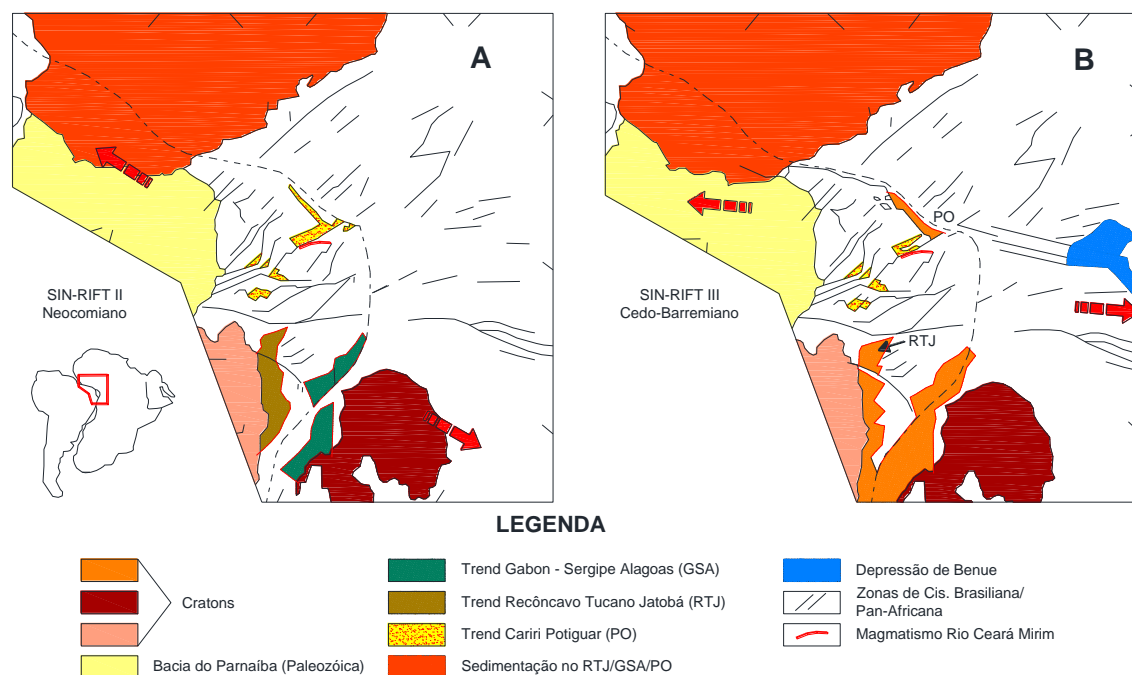


A) Início da separação continental a partir de uma extensa fratura N-S; B) Pólo de rotação no Nordeste do Brasil; C) Pólo de Rotação deslocado para o Norte do Brasil; D) Predomínio de movimento transcorrente destal; e E) Evento compressivo de direção N-S. Fonte: Françolin & Szatmari (1987).

Para Matos (1992), a evolução ocorreu de forma puramente extensional de direção NW-SE e E-W, com três estágios tectônicos denominados de sin-rifts I, II e III. Estes estágios caracterizam a diferença temporal e espacial das bacias do sistema de rift do nordeste brasileiro, sendo que a Bacia Potiguar se formou nos estágios sin-rifts II e III. Este autor afirma que o início da Bacia Potiguar se deu no Neocomiano-Eobarremiano e não no Jurássico Superior como defendem Françolin & Szatmari (1987).

No estágio sin-rift I iniciaram-se fases distensivas, gerando extensas depressões com formação de bacias rasas a partir do seu preenchimento. No estágio sin-rift II, desenvolveram-se rifts resultantes de extensões máximas (WNW-ESE), associadas a grandes fraturas na porção superior da crosta. E por último, o estágio sin-rift III, que ocorreu durante o Neobarremiano-Eoaptiano, correspondente a extensão propriamente dita, configurando a geometria final da margem leste da América do Sul, resultante da mudança dos esforços distensivos WNW-ESSE para E-W (Figura 5).

Figura 5 - Estágios sin-rift II (A) e sin-rift III (B) da Bacia Potiguar.



Fonte: Matos (1992).

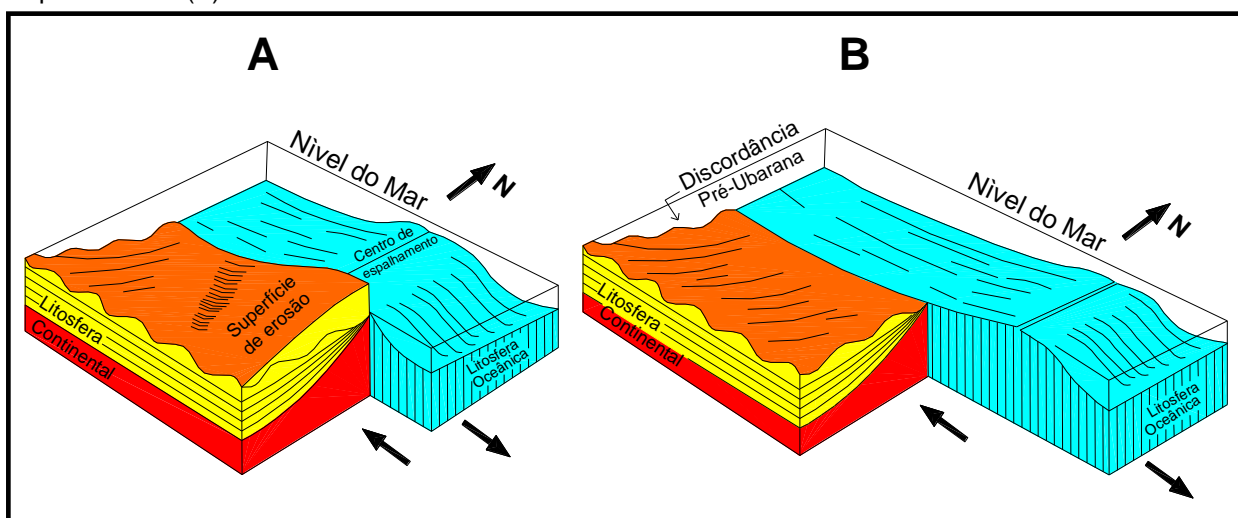
#### 4.3.2 Evolução Cenozóica

A transição da era Mesozóica para Cenozóica é marcada pela discordância sobre as formações Jandaíra e Ubarana e posterior deposição da seqüência marinha regressiva.

Segundo Cremonini (1993) e Cremonini & Karner (1995), a erosão generalizada que ocorreu na Formação Jandaíra e Ubarana foi acarretada por soerguimento regional produzido pelo fluxo de calor proveniente da crosta oceânica que se formava ao longo da margem equatorial brasileira. Para Sial (1975), este evento forneceu energia suficiente capaz de reativar diversos falhamentos como o sistema de falhas de Carnaubais e Afonso Bezerra, além de dobramentos significativos e ascensão de magmas (Figura 6).

A partir do Neocampaniano até o Holoceno, a seqüência regressiva da bacia instala-se com a deposição da Formação Tibau e Guamaré (ARARIPE & FEIJO, 1994). Costa Neto (1985) considera que a intrusão relacionada à Formação Macau ocorreu durante uma reativação tectônica no Terciário (Oligoceno). A partir do Mioceno, começa a deposição da Formação Barreiras (SUGUIO *et al*, 1995).

Figura 6 - Passagem do centro de espalhamento oceânico em frente à Bacia Potiguar, resultado do soerguimento e erosão (A) e início de resfriamento e subsidência da bacia, após passagem do centro de espalhamento (B).



Fonte: Cremonini & Karner (2008).

#### 4.4 Arcabouço estrutural

A bacia potiguar, segundo Bertani et al (1990), é dividida em três feições mofo-estruturais: grábens, altos internos e plataformas rasas.

Os grábens da porção submersa são assimétricos e orientados aproximadamente paralelos à atual linha de costa. Os grábens da porção emersa estão representados pelos Grábens de Apodi, Umbuzeiro, Guamaré e Boa Vista, exibindo feições lineares de direção NE-SW, também de forma assimétrica, limitados a sudeste e sudoeste por falhas que ultrapassam 5000 m de rejeito. Os grábens estão preenchidos por seqüências sedimentares do Cretáceo Inferior.

Os altos internos correspondem às cristas alongadas do embasamento separando os principais grábens. São compostos por blocos de gnaisses, migmatitos ou xistos soerguidos por falhas normais. Os principais altos internos são os Altos de Quixaba, Serra do Carmo e Macau, subparalelas aos eixos dos grábens adjacentes. As seqüências do Cretáceo Inferior estão ausentes sobre os altos internos devido à erosão ou não-deposição.

As plataformas rasas do embasamento de Touros e Aracati flanqueiam os grábens centrais a este e oeste. Essas plataformas são normalmente recobertas por sedimentos do Aptiano e Cretáceo Superior na parte terrestre e também por seqüências terciárias na parte marítima.

Diversas pesquisas realizadas no Rio Grande do Norte com métodos geofísicos e sensoriamento remoto, detectaram conjuntos de falhas paralelas, com características geométricas, estruturais e tectônicas semelhantes, definindo dois sistemas orientados segundo as direções NE-SW e NW-SE. Alguns autores, como Dantas (1998), adotaram, respectivamente, a nomenclatura de Sistema de Falhas Carnaubais e Sistema de Falhas Afonso Bezerra.

Estes sistemas influenciaram toda a dinâmica costeira com reativações tectônicas recentes no arcabouço estrutural da Bacia Potiguar, bem como provocaram a migração e o armazenamento de óleo na parte rasa da Bacia.

Segundo Françolin e Szatimari (1987), numerosas falhas de direção NE-SW, incluindo o Sistema de Falhas de Carnaubais (SFC), teriam sido formadas e/ou reativadas por movimentos compressivos E-W, durante o Neocomiano, que causaram movimentos transcorrentes dextrais e transtracionais. Estes movimentos foram interrompidos durante o Aptiano, quando iniciou um evento distensivo N-S. Uma última reativação de numerosas falhas na bacia, assim como o soerguimento da plataforma carbonática da Formação Jandaíra, ocorreu como consequência de um evento compressivo N-S, durante o Neocretáceo.

Já Matos (1992), defende que, durante o Neocomiano, ocorreu a abertura dos meio-graben NE-SW e que o SFC, representado por falhas lítricas normais intracrustais, teria exercido um forte controle no desenvolvimento no arcabouço tectônico da bacia.

Alguns autores, dentre eles Caldas *et al.* (1997) e Caldas (1998) relatam que a ocorrência de eventos tectônicos causaram a reativação no SFC e caracterizaram localmente como um sistema de falhas subverticais que afetaram inclusive sedimentos holocênicos.

Um conjunto de falhas paralelas, que estão orientadas segundo a Falha de Afonso Bezerra, é denominado de Sistemas de Falhas Afonso Bezerra (SFAB). Esta falha de direção NW-SE foi identificada por Hackspacher *et al.* (1985) através de sensoriamento remoto, na qual possui uma extensão de aproximadamente 150 km, entre as cidades de Afonso Bezerra e Areia Branca. Esses autores também reconheceram uma complexa trama estrutural onde os lineamentos NE e NW se entrelaçam e penetram por quase toda a Bacia Potiguar.

Hackspacher *et al.* (1985) relataram que o *trend* NE tem reconhecida predominância sobre o NW, refletindo, assim, em alternâncias de falhas escalonadas

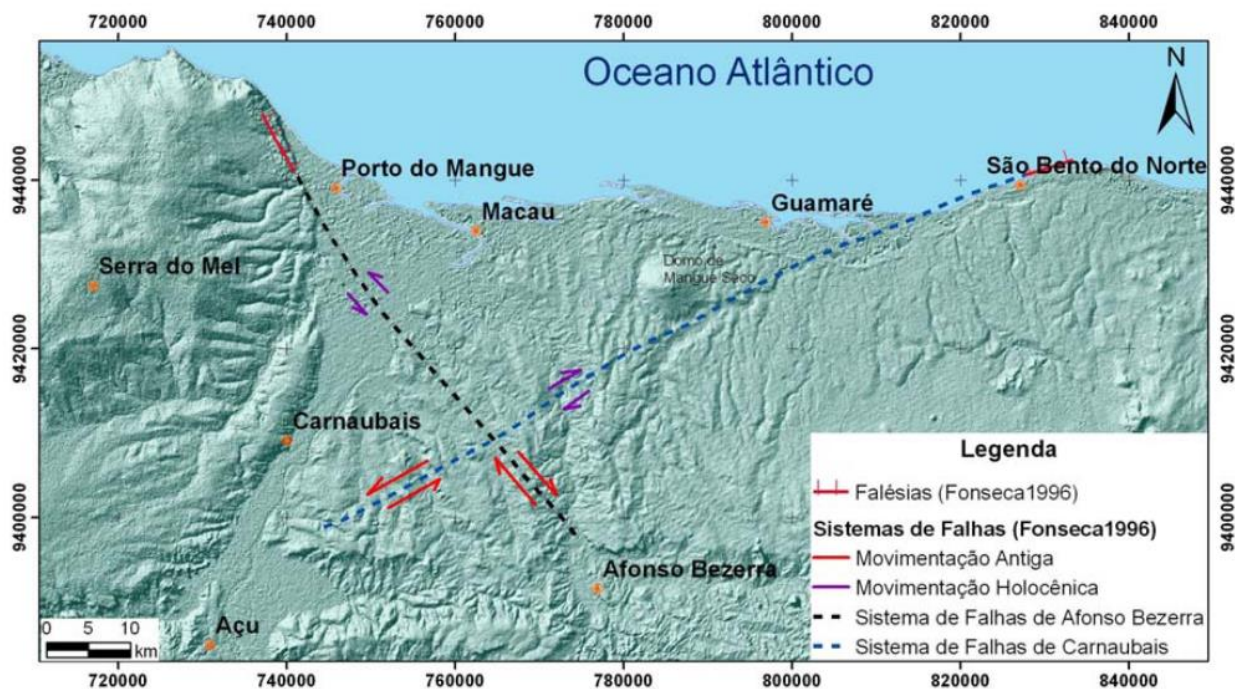


formando altos (p. ex. Quixaba e Macau) e baixos (p. ex. Umbuzeiro e Guamaré). Este autor também admite que o SFAB é posterior ao SFC, associando-o a uma tectônica distensiva, representada por falhas normais, com abatimento de blocos para NE.

A evolução da porção litorânea entre Aracati (CE) e Touros (RN) está associada à reativação dos SFAB e SFC, resultantes de movimentos tectônicos verticais (SRIVASTAVA & CORSINO, 1984). Fonseca (1996) evidenciou como responsável pela compartimentação entre a Ponta do Mel (RN) e a Ponta dos Três Irmãos (RN) o par conjugado definido por estas falhas, reativando parte da estruturação pré-existente e modelando a superfície regional atual, além de influenciar na evolução e processos de sedimentação costeira (Figura 7). Caldas (1996) argumentou a existência de uma relação da geometria do litoral setentrional, entre Caiçara do Norte e São Bento do Norte, com a orientação do Sistema de Falhas de Carnaubais, concordando com Bezerra et al. (1998) que propõem um soerguimento nos últimos 5000 anos para a porção leste da Falha de Carnaubais nesta área.

A influência destas estruturas na geomorfologia foi também constatada em outras porções da Bacia Potiguar, como, por exemplo, a que Moura (2004) analisou na geomorfologia da Chapada do Apodi. Dantas (2004) utilizou técnicas de geoprocessamento para reconhecer lineamentos NW na porção central e sudeste da Falha de Afonso Bezerra, e concluiu que altos topográficos estão alinhados com vales de drenagens e bordas de lagoas.

Figura 7 - Compartimentação do litoral entre Ponta do Mel e Ponta dos Três Irmãos, como consequência do par conjugado definido pelo SFC e SFAB.



Fonte: Modificado de Fonseca (1996).

#### 4.5 Formação Jandaíra

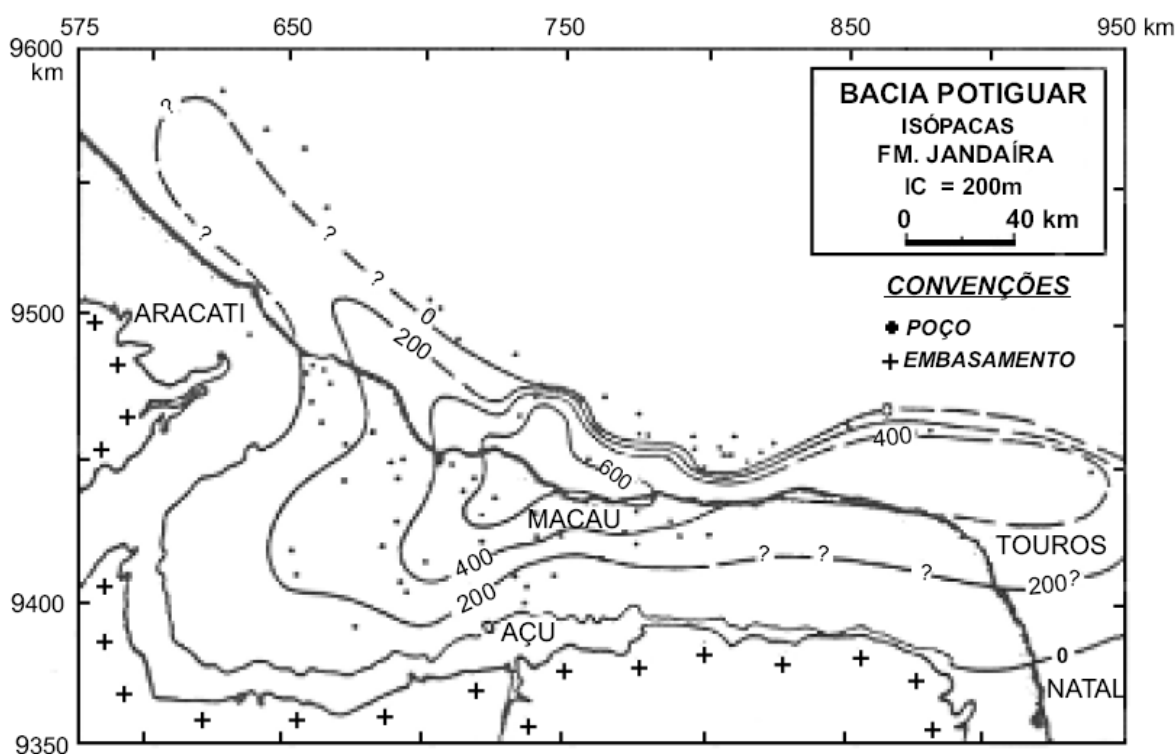
A Formação Jandaíra é uma seqüência transgressiva carbonática que compõe a fase drifte de evolução da Bacia Potiguar e está sotoposta concordantemente à Formação Açú (BERTANI *et al.*, 1990; CASSAB, 2003).

As rochas carbonáticas desta formação afloram em praticamente toda a porção emersa da bacia, parte da Chapada do Apodi, onde se encontram intensamente erodidas e carstificadas sob forma de platô, com mergulho suave para nordeste. Na zona litorânea, encontram-se parcialmente recobertas pelos sedimentos terciários e por aluviões e dunas quaternárias. Em subsuperfície se estende desde a porção emersa da bacia até a plataforma continental. De acordo com o mapa de isópacas (Figura 8), sua maior espessura estimada é de 600m e as menores se encontram nos extremos (TIBANA & TERRA, 1981; SOUZA, 1982).

O padrão estratal dos sedimentos dessa seqüência consiste de estratos com mergulhos suaves e clinofomas sigmoidais típicas de bacias de margem em rampa. Dentro do pacote carbonático é possível individualizar duas seqüências deposicionais. Uma seqüência correspondente ao intervalo Neoturoniano –

Eosantoniano e que tem o limite basal marcado por evidente quebra nos perfis de poços e bruscas mudanças ambientais identificadas nas associações bioestratigráficas. Constitui-se por grainstones bioclásticos e oolíticos na porção proximal e por wackestones e mudstones na porção distal. A última seqüência, que corresponde ao intervalo Neo-santoniano – Eocampaniano é caracterizada pelo total domínio da sedimentação carbonática na bacia, inclusive na porção proximal (NETO *et al*, 2007).

Figura 8 - Mapa de isópacas da Formação Jandaíra.



Fonte: Souza, 1982.

#### 4.6 Formação Açu

A Formação Açu, de idade Albo-Turoniana, é constituída por sedimentos siliciclásticos (com predominância de arenitos e lamitos) e padrão de granodecrescência acendente. Também está relacionada com evento transgressivo e sua espessura pode chegar a 1000m.

Vasconcelos et. al. (1990) compartimentaram a Formação Açu, baseados na variação dos sistemas deposicionais, em 4 unidades denominadas de Açu 1, Açu 2, Açu 3 e Açu 4.

A Unidade Açu 1 compõe a base da formação e é constituída por arenitos grossos e conglomerados provindos de um sistema deposicional do tipo leque aluvial.

A Unidade Açu 2 é constituída por arenitos grossos e finos, siltitos e folhelho, bem como calcarenitos e calcilutitos intercalados. Sua porção inferior apresenta corpos arenosos mais espessos gerados a partir de sistema fluvial entrelaçado. Em direção a sua porção superior há um afinamento dos corpos arenosos e intercalações argilosas, refletindo numa transição de um sistema fluvial entrelaçado para meandrante.

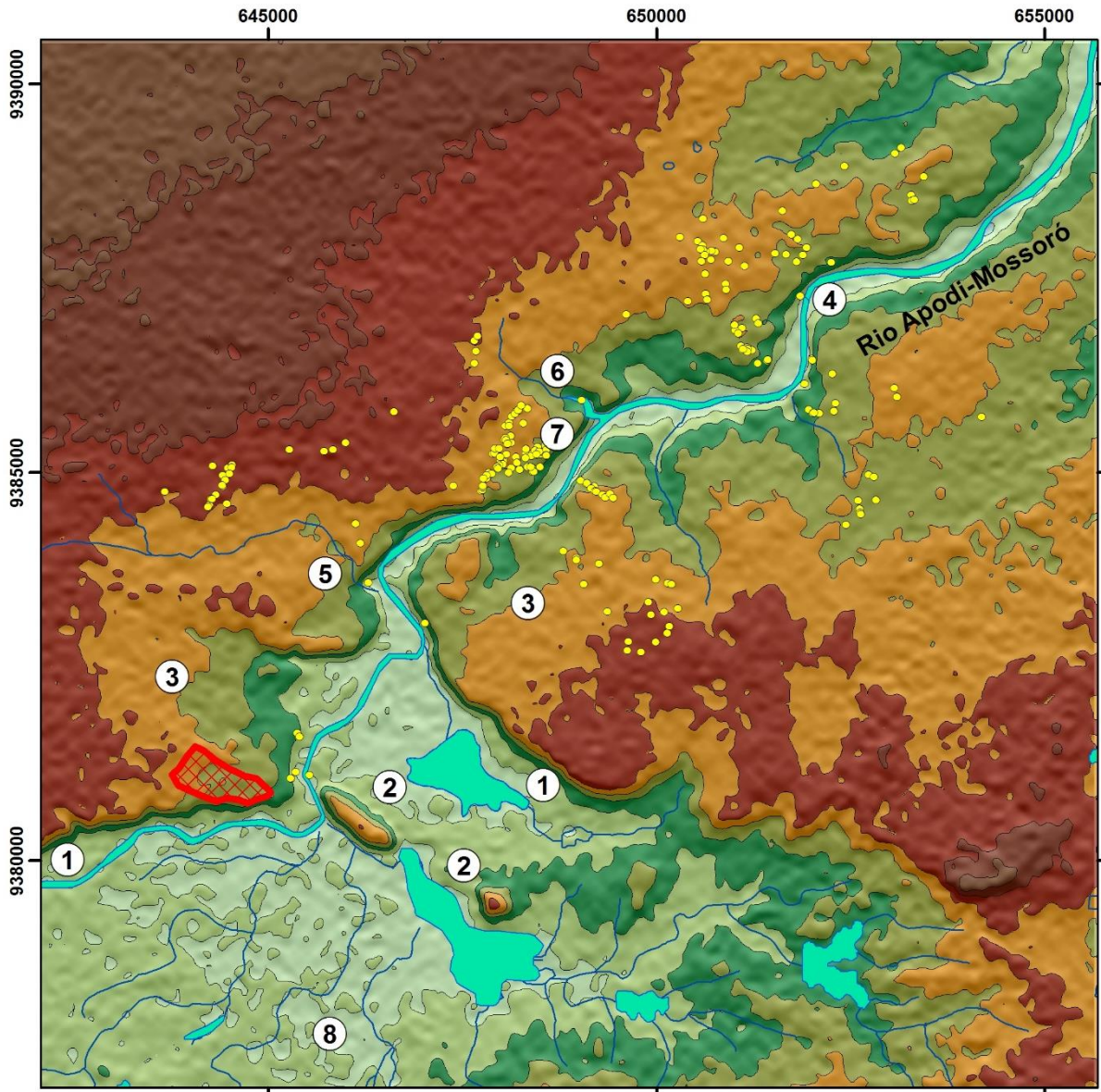
A Unidade Açu 3 é caracterizada por apresentar arenitos grossos a finos, siltitos e folhelhos, apresentando arenitos mais grossos e espessos na base, tornando-se mais argilosos em direção ao topo. O ambiente deposicional desta unidade é interpretado como híbrido, envolvendo características de sistemas entrelaçados e meandrantas.

A Unidade Açu 4 compõe o topo da formação, sendo composta por arenitos médios a muito finos, argilitos, folhelhos, siltitos e, as vezes, calcilutitos e margas dolomitizadas. O sistema deposicional desta unidade é interpretado como sendo litorâneo estuarino com desenvolvimento de ilhas barreiras, cortadas por canais de maré com laguna na retaguarda.

## 5 GEOLOGIA E GEMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

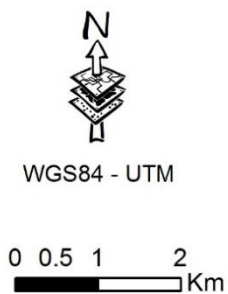
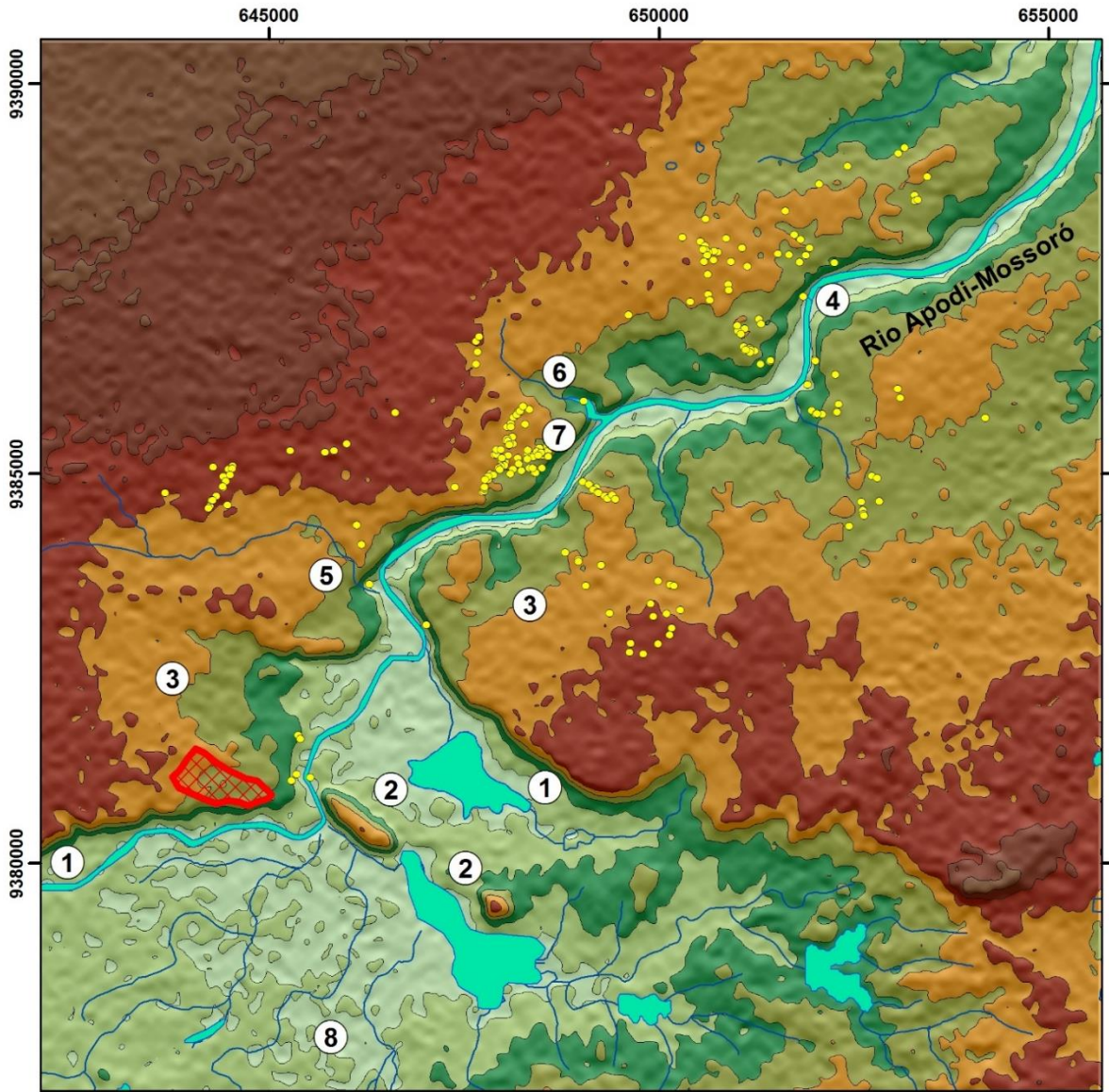
Na geomorfologia da área de pesquisa observam-se dois patamares topográficos bem nítidos. O patamar Norte, com cotas mais elevadas, apresenta altitudes que variam de 60 a 130 metros, e é definido como o topo da Bacia Potiguar (Chapada do Apodi). Sua superfície é relativamente plana, com leves inclinações voltadas para SE (porção Oeste) e para NE (porção Leste). Já no patamar Sul, ocorre a porção mais arrasada da Bacia do Apodi, com altitudes que variam de 30 a 40 metros, e é definido como uma planície aluvionar, sua morfologia atesta pronunciados efeitos da erosão fluvial a que foi submetida (Figura 9). Já a geologia se apresenta pouco diversificada com a presença da Formação Jandaíra, Formação Açú e depósitos aluvionares recentes e antigos (Figura 10).

Figura 9 - Mapa hipsométrico da área de pesquisa.










\*Fonte: SRTM

Figura 10 - Mapa geológico da área de pesquisa.



**LEGENDA**

	Cidade de Felipe Guerra	<b>Altimetria</b>
	Drenagem	 20 - 30
	Cavidades naturais	 30 - 40
	1-Escarpa	 40 - 50
	2-Morro testemunho	 50 - 60
	3-Chapada do Apodi	 60 - 70
	4-Canyon	 70 - 80
	5-Cachoeira do Roncador	 80 - 90
	6-Cachoeira da Caripina	 90 - 100
	7-Lajedo do Rosário	 100 - 110
	8-Planície Aluvionar	 110 - 120
		 120 - 130

\*Fonte: SRTM, Angelim *et al.* (2006)

Os calcários da Formação Jandaíra, situados no topo da chapada, encontram-se encobertos por solos carbonáticos ou expostos na forma de afloramentos (lajedos). Os afloramentos ocorrem em tamanhos variados que vão desde pequenos blocos isolados até superfícies com quilômetros de extensão. Em algumas porções, predominam feições típicas de dissolução, decorrentes do intenso processo de carstificação em superfície e em subsuperfície, tais como lapiás, dolinas, ravinhas, cavernas, cachoeiras e canyons. Também, por influência da carstificação, esta região apresenta extensas zonas sem drenagens superficiais, neste caso, as águas escoam preferencialmente em subsuperfície, em uma complexa rede de drenagem subterrânea. A formação Jandaíra mostra-se intensamente marcada por falhas e fraturas (Figura 11).

O Rio Apodi-Mossoró, cujo canal principal está orientado segundo a direção NE-SW, entalha a chapada formando um vale inciso, conhecido como *canyon* do Rio Apodi-Mossoró, feição bem marcada no mapa hipsométrico. O *canyon* cárstico inicia-se com eixo transversal de aproximadamente 1.000m, podendo chegar até 250m nos intervalos mais estreitos. A intensa dissecação erosiva do *canyon* formou encostas bastante íngremes e verticalizadas com até 50m de altitude (Figura 11).

Na escarpa da Chapada do Apodi, resultante do recuo erosional de sua borda, encontram-se coberturas coluvionares e afloram as litologias da unidade Açú 4 (VASCONCELOS *et al.* 1990), que corresponde ao topo da Formação Açú.

No patamar Sul, localiza-se a planície aluvionar do Rio Apodi-Mossoró e drenagens secundárias, que se estendem pelo interior do *canyon*. Nesta porção são encontrados depósitos aluvionares recentes e antigos, bem como exposições da unidade Açú 3 da Formação Açú (VASCONCELOS *et al.* 1990).

Nas vertentes do *canyon* do Rio Apodi-Mossoró expõem-se as Formações Jandaíra e Açú, bem como depósitos quaternários de tufas calcárias (BARBOSA, 2013 e REYES PÉREZ, 2003). Em alguns setores as Formações Jandaíra e Açú encontram-se em níveis topográficos semelhantes, isso se deve ao resultado da evolução da bacia caracterizada por altos e baixos estruturais.



Figura 11 - Carstificação na Formação Jandaíra.



Superfície carstificada e marcada por estruturas rúpteis (a); Borda leste do *canyon* Apodi-Mossoró verticalizada (b).

Contrastando com o relevo arrasado do patamar Sul, erguem-se dois morros testemunhos alinhados segundo a direção ENE-WSE, coincidindo com o traçado da Falha do Apodi. Com formas abauladas, apresentam cotas máximas similares ao da chapada (superiores a 80 metros) e são constituídos de calcários da formação Jandaíra nos topos e de rochas da formação Açú nas vertentes.

## 6 RELEVO CÁRSTICO

Carste (ou relevo cárstico) é compreendido como terreno com hidrologia e geomorfologia distintas, que surgem a partir da combinação de rocha de alta solubilidade e porosidade secundária bem desenvolvida. Tais áreas são caracterizadas por conter sumidouros, cavernas, depressões fechadas (dolinas), afloramentos rochosos acanalados e nascentes, bem como extensiva e complexa rede de águas subterrâneas. A rocha solúvel sozinha é insuficiente para gerar um carste, as estruturas (descontinuidades) e a litologia também são importantes: a rocha densa, maciça, pura e intensamente fraturada condiciona melhor a formação do carste. O carste pode se desenvolver em rochas carbonáticas, mármore e evaporitos. (FORD & WILLIAMS, 2007).

O termo carste (karst) se origina da palavra Kras (germanizada para Karst), que significa aproximadamente, em língua eslovena, “campo de pedras”. Kras é uma região calcária na atual Eslovênia que foi submetida aos primeiros estudos científicos do gênero e é conhecida como “carste clássico. A região atingiu destaque internacional através das investigações de Cvijić (1893, 1901, 1918 in Williams, 2008), considerado por muitos como o pai da ciência cárstica moderna.

### 6.1 Carstogênese

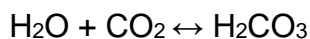
A formação de um relevo cárstico é fortemente condicionado por processos hidrogeoquímicos através da água rica em CO<sub>2</sub>, naturalmente acidulada. Assim, a solubilização das rochas superficiais e subterrâneas favorece os processos morfogenéticos responsáveis pela dinâmica e evolução do relevo.

Para cumprir seu papel de agente de dissolução, a água penetra no sistema via porosidade. No domínio cárstico, a porosidade da rocha encontra-se dividida em primária e secundária. A porosidade primária é representada principalmente pelas características de petrofábrica, ou seja, relacionado a porosidade intergranular, constituída durante a diagênese. Já a porosidade secundária, representada por planos de acamamento, juntas, fraturas, falhas, entre outras estruturas formadas geralmente pós-diagênese, é de real importância no carste (PILÒ, 2000). Vale ressaltar que os sistemas de condutos e fraturas são o principal meio de circulação de água em

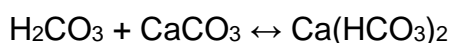
aquíferos cárticos por representarem as principais estruturas que guiam o fluxo (MILANOVIC, 1981; KLIMCHOUK, 2000).

Segundo Auler *et al.* (2005), a formação de paisagens cársticas acontece durante um longo intervalo temporal. Este processo se inicia pela combinação da água da chuva ou de rios superficiais com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera ou do solo (proveniente das raízes da vegetação e matéria orgânica em decomposição). O resultado é a formação de uma solução ácida ou ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) que ao entrar em contato com rochas calcárias, por sua vez, reage com o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), componente essencial das rochas carbonáticas, transformando-se em bicarbonato de cálcio (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), sendo solubilizado e carregado pelas águas. Dissolvendo, assim, a rocha especialmente ao longo de estruturas pré-existentes, tais como fraturas. Esses processos químicos podem ser expressos pelas seguintes reações:

#### **Acidulação da água**



#### **A dissolução de rocha carbonática:**



Os climas com maior disponibilidade hídrica são mais favoráveis ao desenvolvimento de áreas cársticas. Acrescenta-se, ainda, que além da água estar presente no sistema em circulação, faz-se necessário que o relevo apresente gradiente hidráulico de moderado a alto e amplitude topográfica acima do nível do mar (KARMANN, 2008).

Ford & Willams (2007) relatam a importância da temperatura para a capacidade da solução química dissolver mais, ou menos, carbonato de cálcio. A 25°C, a solubilidade da calcita na água equilibrada em atmosfera padrão (Pressão CO<sub>2</sub>=0,03%) é de 55mg l<sup>-1</sup>. Esse valor aumenta para 75mg l<sup>-1</sup> a 0°C.

### 6.1.1 Feições Cársticas

Auler *et al* (2005) ainda explica que o sistema cárstico compreende, em linhas gerais, o ambiente externo, denominado como exocarste, marcado por formas superficiais geradas primordialmente pelo ataque químico de águas meteóricas; e o domínio subterrâneo, chamado de endocarste, representado por cavidades geradas pela dissolução por águas subterrâneas de origem diversa. Um terceiro domínio, o epicárste, ainda pode ser reconhecido, dizendo respeito à zona logo abaixo da superfície, englobando o contato entre o solo e a rocha calcária.

#### 6.1.1.1 Exocarste

As feições superficiais são, geralmente, formadas por águas meteóricas, seja através de contato direto com o carbonato, por sob a cobertura pedológica ou através de drenagens.

Lapiás (ou “*karen*”) é um termo usado para descrever formas desenvolvidas a partir de dissoluções em pequena escala, tais como cavidades, sulcos e canais na superfície e subsuperfície. Sua formação é atribuída à dissolução da rocha calcária (origem química), mas também pode ser influenciada pelo impacto das gotas da chuva e até por mesmo fraturas (origem física). No caso de lapiás gerados sob o solo, a morfologia é mais suave e arredondada (AULER *et al*, 2005; FORD & WILLIAMS, 2007).

Dolinas são depressões fechadas, em formato de funil ou cilíndricas, extremamente comuns em regiões cársticas. São geradas por dois mecanismos principais, dissolução subsuperficial em fraturas, causando o rebaixamento da superfície da rocha e/ou penetração do solo, e colapso devido ao abatimento do teto de uma caverna no solo ou na rocha. A coalescência de duas ou mais dolinas recebem o nome de uvala ou dolina composta (AULER *et al*, 2005).

White (1988) denomina as feições de transição morfológica que conjugam características fluviais e cársticas como fluviocársticas, que são caracterizadas pela ocorrência de curso d’água com trechos superficiais e subterrâneos, na qual a drenagem pode ter sua origem no próprio carste (autóctone) ou fora dele (alóctone). Dentre essas feições destacam-se: (i) os sumidouros ou vales cegos, que correspondem a interrupção abrupta da drenagem para o início do seu percurso

subterrâneo; (ii) as ressurgências ou vales recuados, que definem o retorno da drenagem ao curso superficial; (iii) os vales secos, que configuram testemunhos de antigo vale fluvial cujo curso hoje corre subterrâneo; e (iv) os canyons, que constam de vales encaixados com paredões abruptos com origem normalmente relacionada a abatimentos de sistemas subterrâneos (JENNINGS, 1985; WHITE, 1988; KOHLER, 1995; PILÓ, 1998; PILÓ, 2000)

As formas anteriormente descritas são geradas pela dissolução da rocha. Algumas outras feições, ao contrário são geradas pela precipitação do carbonatos. Esse é o caso das tufas calcárias, depositadas por águas saturadas em carbonato de cálcio. Essas formas construtivas muitas vezes são formadas com extrema rapidez, podendo causar a agradação de vales (AULER *et al*, 2005).

#### 6.1.1.2 *Endocarste*

No domínio endocártico, tem-se tanto as cavidades penetráveis pelo homem, classificadas como cavernas, quanto cavidades não acessíveis por conta de suas dimensões ou por não existir pontos de entrada e saída, denominadas como protocavernas, formas embrionárias das cavernas. As protocavernas podem variar de pequenos vazios até grandes salões, ocasionalmente encontrados na mineração e perfuração. Essas cavidades podem ser originadas pela ação de águas de origem meteórica (que se infiltram no maciço carbonático) e de águas de origem hipogênica (profunda), no qual a acidez da água provém de fontes não atmosféricas. As cavernas em si gradam desde seu estágio inicial de formação, representado por rede de protocondutos, até o estágio final, quando a cavidade se torna seca e prestes a ser interceptada pelo rebaixamento erosivo (KLIMCHOUK *et al*, 2000; AULER *et al*, 2005).

No interior das cavernas são encontrados depósitos dos tipos (i) químicos, os quais são formados pela precipitação do material em solução, tais como espeleotemas; (ii) clásticos, que representam fragmentos de rocha e sedimentos; e (iii) orgânicos, que constam da matéria orgânica antiga preservada (fósseis) em sedimento, tais como tufas calcárias.

Quanto à origem, os depósitos são designados alóctones, quando correspondem materiais vindos do meio externo à caverna. Estes podem ter sido transportados para o seu interior por agentes como água, vento ou gravidade, como por exemplo sedimentos e matéria orgânica. Quando os depósitos agrupam materiais

gerados dentro da própria caverna são definidos como autóctones, sendo exemplos espeleotemas, blocos abatidos por desmoronamento e resíduos insolúveis da própria rocha, como argila (OLIVEIRA, 2008).

Os espeleotemas constam do tipo de depósito mais comum em cavernas carbonáticas e são compostos, na grande maioria das vezes, por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), em geral sob forma de calcita e aragonita. A classificação dos espeleotemas se deve, principalmente, a forma de como são depositadas (p. ex. estalactite, estalagmite, coluna, cortina, couve-flor, etc). Sua formação ocorre quando a solução aquosa saturada em bicarbonato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) atinge o ambiente cavernícola, encontrando atmosfera com baixa pressão parcial de  $\text{CO}_2$ . Assim, ocorre a liberação  $\text{CO}_2$  da solução aquosa para a atmosfera da caverna, resultando na precipitação do carbonato de cálcio e a consequente formação de espeleotemas. Esse processo é sintetizado na seguinte equação:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$  (AULER *et al*, 2005).

#### 6.1.1.3 Importância do controle tectônico e estrutural

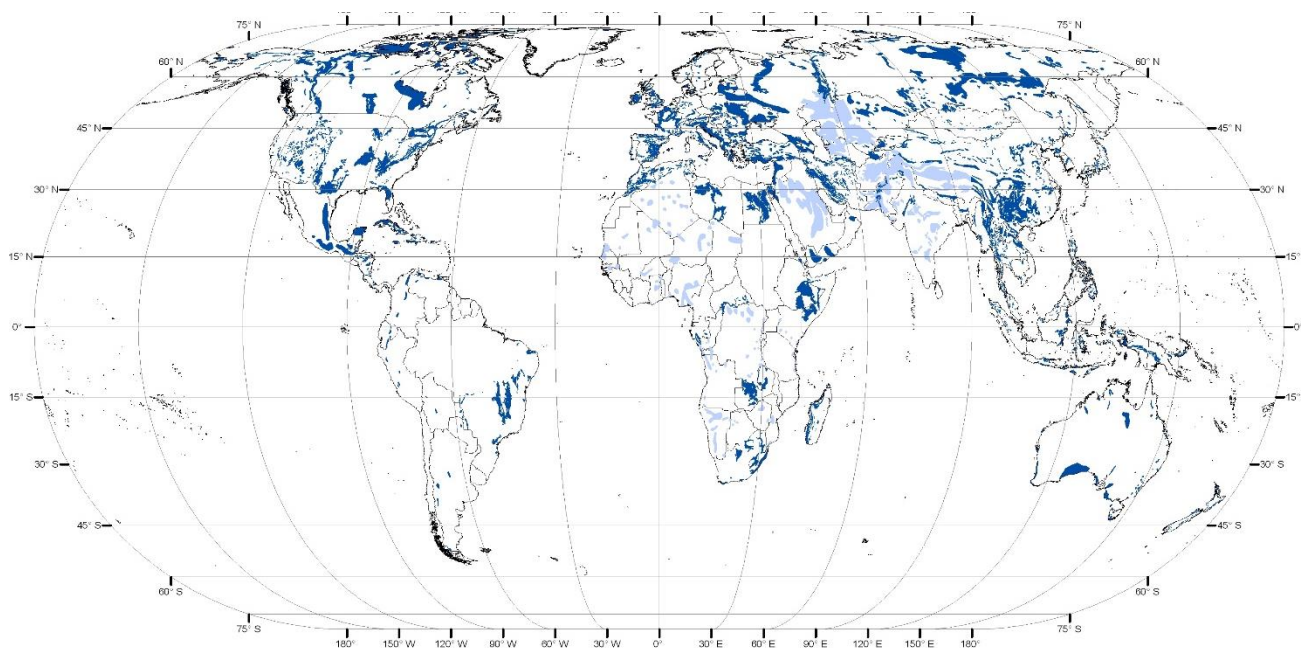
São extremamente raros trabalhos que enfoquem de forma direta acerca da gênese do carste em função do controle estrutural e tectônico. Entretanto, especialistas do carste enfatizam que o desenvolvimento das paisagens cársticas está condicionado, além da presença de rochas suscetíveis a solubilização, a características bioclimáticas e estruturais e/ou tectônicas (AULER *et al*, 2005).

Segundo Palmer (1991), se as condições estruturais e estratigráficas não condicionam todas as características geométricas dos sistemas endocársticos, elas influenciam a orientação e a extensão das cavidades. Esse autor relata que 90% das cavernas por ele estudadas tem origem epigênica, cujo desenvolvimento foi controlado pelos planos de estratificação (57%) e fraturas (42%). Os sistemas de juntas podem influenciar a dissolução já na fase de “pré-iniciação” (protocondutos) do sistema cárstico, conduzindo a um padrão de condutos subterrâneos angulosos.

## 6.2 Áreas Cársticas

As áreas cársticas (Figura 12) compreendem cerca de 10 a 15% da superfície terrestre, principalmente, as desenvolvidas em rochas carbonáticas como, por exemplo, o calcário e o dolomito (FORD & WILLIAMS, 2007). Tais regiões vêm sendo utilizadas desde os primórdios da humanidade como fontes de alimentos e abrigo. Foram locais para o estabelecimento dos primeiros assentamentos humanos devido à disponibilidade tanto de água potável como de alimentos. Por todo o mundo é possível constatar que populações inteiras são abastecidas por mananciais cársticos e, em várias culturas, as cavernas ainda são utilizadas como locais para a prática de cultos religiosos (TRAVASSOS, 2010).

Figura 12 - Distribuição da cobertura de rochas carbonáticas na superfície terrestre.



As áreas em azul escuro correspondem a regiões carbonáticas relativamente contínuas. As áreas em azul claro correspondem a regiões abundantes em rochas carbonáticas não contínuas. Fonte: WILLIAMS & FONG (2010).

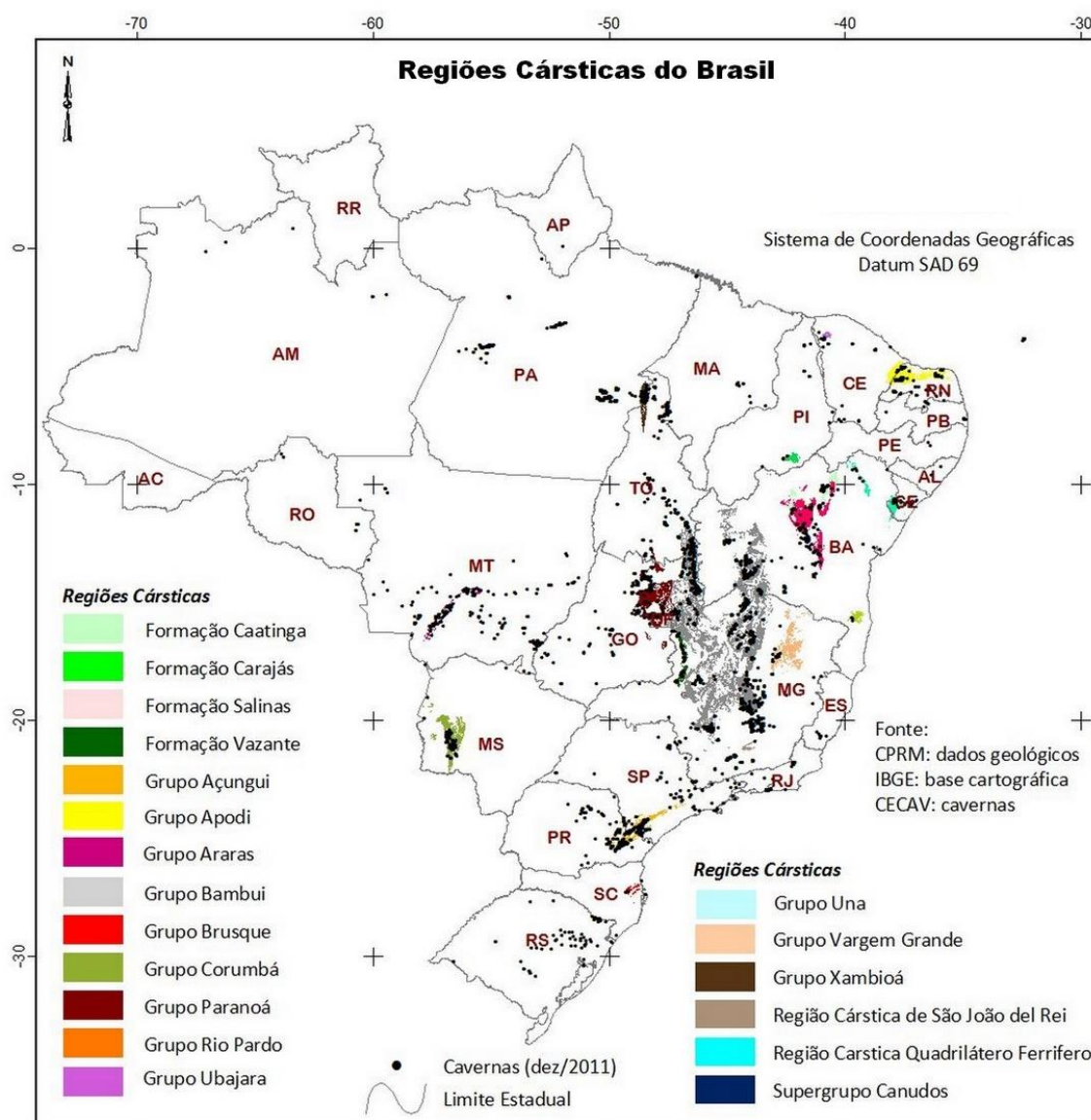
### 6.2.1 No Brasil

Cerca de 5 a 7% do território brasileiro está ocupado por carste carbonático, constituindo um importante componente nas paisagens do país (KARMANN *et al.*, 2008). Schobbenhaus *et al.* (1981) calculam que as áreas carbonáticas brasileiras, totalizam em torno de 200 mil km<sup>2</sup>.

O carste brasileiro ocorre, principalmente, em áreas de carbonatos antigos, de idade predominantemente Pré-Cambriana, desenvolvidos em regiões tectonicamente estáveis (crátons) e sob clima sazonal. A maior parte das áreas cársticas se desenvolve em carbonatos do Grupo Bambuí, situado nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia (AULER *et al.*, 2005).

Entretanto, Auler *et al.*, (2005) enfatiza que o carste no país ocorre não apenas em áreas de carbonatos, mas também em rochas siliciclásticas, como arenitos e quartzitos. O mapa das Regiões Cársticas do Brasil (Figura 13), elaborado por CECAV (2009), exhibe a distribuição de cavernas e identifica 19 regiões cársticas, das quais cinco delas são formações não carbonáticas (Região Cárstica do Quadrilátero Ferrífero, Formação Carajás, Formação Salinas, Grupo Xambioá e Grupo Paranoá).

Figura 13 - Regiões Cársticas do Brasil.



Fonte: CECAV (2009)



### 6.2.2 No Rio Grande do Norte

No noroeste do Brasil a Bacia Potiguar apresenta um diversificado modelado cárstico, desenvolvido principalmente sobre a Formação Jandaíra do Grupo Apodi, situada nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Nessa região, a climatologia atual não favorece os processos de dissolução de carbonatos relacionados ao intemperismo químico, pois o longo período de estiagem (em média 8 meses) e a baixa umidade relativa do ar limitam a morfogênese cárstica. Entretanto, essa limitação não é suficiente para tornar a região desprovida de carstificação, é possível observar em algumas áreas uma série de feições características. Sendo assim, evolução mais atuante do carste da Formação Jandaíra ocorreu provavelmente em climas passados. Nesse caso, a morfologia cárstica e os indicadores geológicos como os depósitos de tufas calcárias constituem importantes indicadores paleoclimáticos (AULER *et al.*, 2005, BOGGIANI *et al.*, 2002).

A história evolutiva da Bacia Potiguar é marcada por reativações tectônicas as quais originaram um complexo sistema de falhas na Formação Jandaíra. Em muitos casos esses sistemas de falhas apresentam expressão geomorfológica e são passíveis de observação em campo, bem como por imagens de satélite e fotografias aéreas. Atualmente, tais falhas também exercem importante influência na evolução geomorfológica da bacia, que passa a expressar no relevo a complexa trama estrutural vigente. A orientação de falhas, fraturas e juntas condicionam o trabalho de dissecação e formação de feições exocársticas e endocarsticas. Estas estruturas facilitam o acesso da água no interior das rochas acelerando seu desgaste químico. Dessa forma, zonas fraturadas potencializam a ação erosiva formando feições cársticas orientadas conforme suas direções (MAIA *et al.*, 2012).

Sobre os carbonatos da Formação Jandaíra, as falhas condicionam o desenvolvimento de um sistema de drenagem angular dos tipos treliça e retangular. Essa drenagem diseca os carbonatos originando vales incisivos de direção NE-SW e NW-SE. As fraturas métricas, por sua vez, encaixam a rede hidrográfica atual. As falhas normais, dolinas de colapso ou de dissolução orientados em linhas de falhas constituem também morfoindicadores de tectonismo na bacia. A origem de algumas cavernas pode estar diretamente ligada às falhas da Bacia Potiguar, evidenciada pela direção das principais galerias. Como exemplo, tem-se a caverna Arapuá que coincide com o *trend* regional, ou seja, distribui-se segundo as direções NE-SW e NW-SE. Os

sistemas de falhas Carnaubais e Afonso Bezerra, orientados respectivamente segundo as direção NE-SW e NW-SE, documentam os efeitos dos últimos campos de tensões cenozoicos da bacia (MAIA et al, 2012).

Segundo a Base de Dados Georreferenciadas das Cavidades Naturais Subterrâneas, gerida pelo núcleo do CECAV (Centro de Estudos, Proteção e Manejo de Cavernas), foram registradas somente no estado do Rio Grande do Norte 563 cavidades, sendo que 469 classificadas como cavernas, 52 como abrigos, 36 como abismos e 4 como dolinas. Dessas cavidades 91,5% ocorrem nos calcários da Formação Jandaíra (CRUZ *et al.*, 2010).

#### 6.2.2.1 Município de Felipe Guerra

O município de Felipe Guerra exibe uma paisagem tipicamente cárstica, onde é possível observar feições, tais como grandes extensões de calcário aflorante (lajedos), tufas calcárias recentes e antigas com matéria orgânica preservada, lapiás, dolinas, nascentes, sumidouros, cachoeiras, canyons e diversas cavidades naturais, que incluem abismos, abrigos e cavernas (Figura 14).

Felipe Guerra possui o segundo maior número de cavidades naturais do Rio Grande do norte, 242 unidades, ficando atrás somente do município de Baraúna (CECAV, 2013). Duas dessas cavidades apresentam dimensões notáveis: a caverna do Trapiá, maior caverna do estado com 2.330 metros de desenvolvimento linear, e a dolina do Xavier, maior dolina do estado com mais de 30 metros de diâmetro e 20 de profundidade (BENTO et al, 2011a).

O aumento do conhecimento acerca do patrimônio espeleológico ganha cada vez mais importância no contexto da conservação destes sistemas e o município de Felipe Guerra, por ter destaque no cenário espeleológico potiguar, concentra a maioria dos estudos realizados no carste norteriograndense (COELHO, 2008; CRUZ *et al.*, 2010; FERREIRA *et al.*, 2008; FERREIRA *et al.*, 2010; SILVA, 2008).

Figura 14 - Feições cársticas no município de Felipe Guerra.

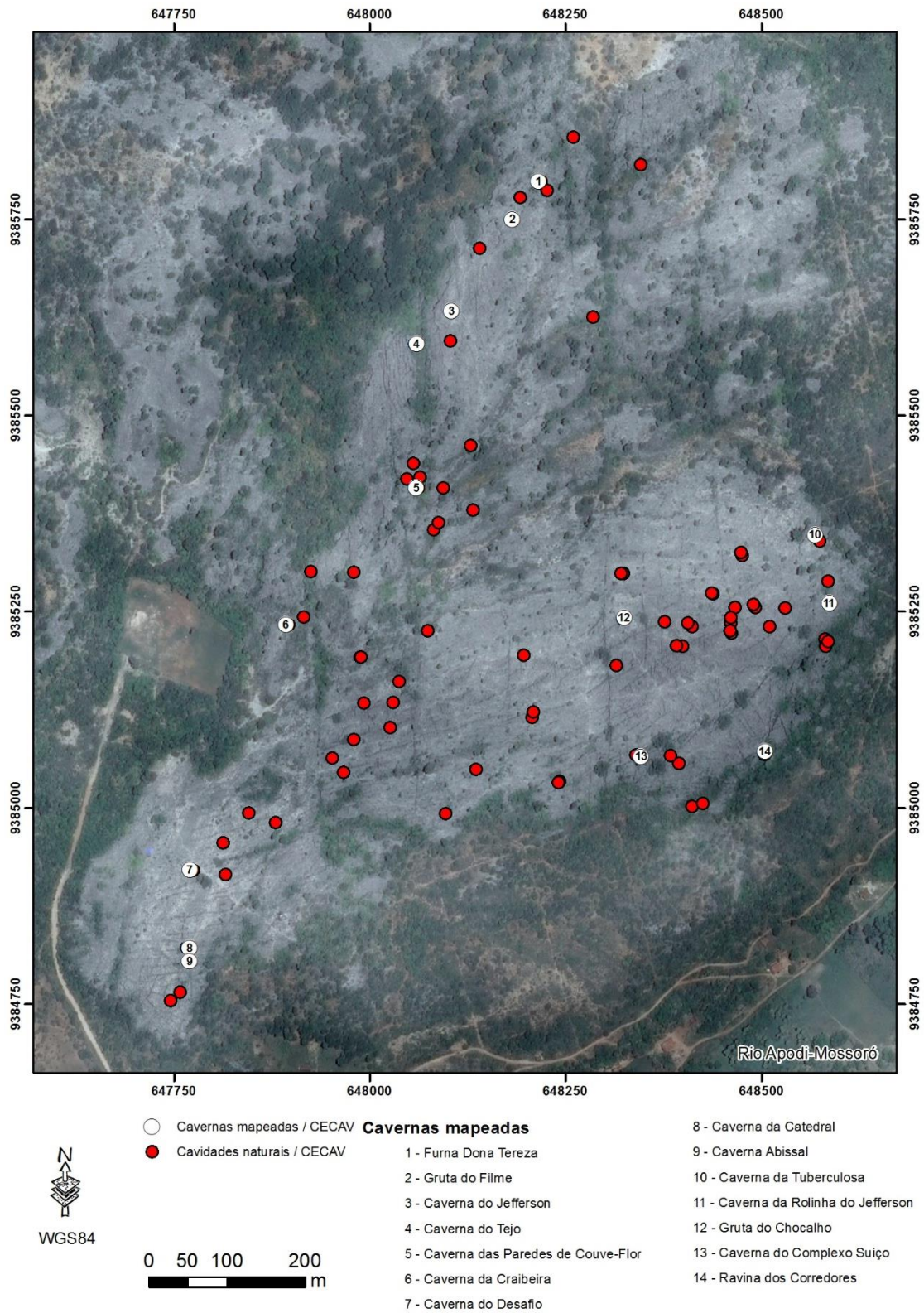


Grande extensão de calcário aflorante (a); Lapiezação em lajedo (b); Depósito de tufas calcárias (c\*) e molde de folha preservado (d\*); Dolina do Xavier, a maior do Rio Grande do Norte (e\*\*); e pequena dolina de colapso associada a fratura (f). Fontes: \*Barbosa, (2013); \*\*Gomes (2008).

Ainda no município de Felipe Guerra, encontra-se o chamado Lajedo do Rosário (Figura 15) que destaca-se por concentrar o maior número de cavidades naturais do estado em um único afloramento, contabilizando 97 unidades (CECAV, 2013). Este lajedo localiza-se na borda oeste do rio Apodi-Mossoró e abrange uma área de aproximadamente 1,3 km<sup>2</sup>. O Lajedo do Rosário, além do número significativo de cavidades, apresenta superfície extremamente irregular (ocasionado pela intensa carstificação) e forte concentração de estruturas rúpteis.

O projeto intitulado como “Karst Jandaíra – Caracterização da Sensibilidade Ambiental e mapeamento das Cavernas de Felipe Guerra e do Sítio Espeleológico da Furna Feia e Áreas Cársticas” (BENTO *et al.*, 2011b), elaborado pelo núcleo do CECV/RN, com o objetivo de identificar áreas onde o patrimônio espeleológico tem relevância máxima (de acordo com a legislação vigente), topografou em Felipe Guerra 33 cavernas, onde 14 delas localizam-se no Lajedo do Rosário. Esse projeto contou com a parceria do laboratório LAGETEC do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará -UFC.

Figura 15 - Lajedo do Rosário e a localização das cavidades naturais.



Fonte: CECAV (2013); Imagem Digital Globe/2013

### 6.2.2.1.1 Descrição das cavidades naturais do Lajedo do Rosário

Segue uma breve descrição das cavernas topografadas no Lajedo do Rosário pelo CECAV e seus respectivos mapas podem ser consultados nos anexos:

#### 1. Furna Dona Tereza.

Esta caverna está localizada no extremo norte do Lajedo do Rosário e seu acesso é feito por descida em pequeno lance vertical, no interior de uma dolina irregular. O desenvolvimento é predominantemente horizontal, as paredes e condutos se mostram bastante irregulares e os salões amplos. A cavidade desenvolveu-se em um único nível, apresenta extensão horizontal de 140m e profundidade máxima de 3,7m. As dificuldades impostas à exploração são tetos baixos, rastejamentos e alguns pequenos lances verticais.

Há acúmulo de solos argilosos em alguns pontos e blocos abatidos irregulares entre 1 e 2m ao longo de toda a caverna. Os espeleotemas são do tipo couve-flôr (de porte pequeno e bem distribuídos na caverna), estalactite (porte pequeno), coluna (porte médio) e estalagmite (porte médio), estando todos estes em bom estado de conservação. Seus condutos mais persistentes estão orientados segundo as direções NW-SE e NE-SW.

#### 2. Gruta do Filme

Situada ao norte do lajedo, a Gruta do Filme é acessada por um pequeno canyon ou por dolina de formato elíptico. A cavidade apresenta desenvolvimento horizontal em dois níveis, 142m de extensão, 4,1m de desnível, traçado dos condutos irregulares e salões amplos. Há presença de blocos abatidos irregulares dispersos, com diâmetro menor do que 1m e de espeleotemas conservados de pequeno porte dos tipos couve flor, colunas e estalactites. Seu conduto mais persistente está orientado na direção N-S.

### **3. Caverna do Jefferson**

Essa caverna, localizada ao centro-norte do lajedo, é acessível por pequeno lance vertical em fratura. A cavidade apresenta desenvolvimento horizontal em nível único, padrão das galerias retilíneo, 42m de extensão e 7,6m de profundidade. As dificuldades na exploração interna resumem-se à necessidade de rastejamento em alguns trechos com tetos baixos. O piso é predominantemente recoberto com blocos abatidos irregulares e apenas espeleotemas do tipo couve flor são observados. As galerias de maiores continuidades estão orientadas para NW-SE e NE-SW.

### **4. Caverna do Tejo**

Localizada na porção centro-norte do lajedo, é acessada por lance vertical. Apresenta padrão misto de desenvolvimento (com predomínio horizontal) em dois níveis, extensão linear de 116m e desnível máximo de 8,3m. As dificuldade impostas à exploração são tetos baixos e rastejamentos. Há presença de blocos cúbicos abatidos com diâmetro entre 1 e 2m e de espeleotemas conservados como couve flor (cobrindo grande parte das paredes), travertinos, escorrimentos calcínicos e estalactites. As galerias mais persistentes, em ambos níveis, estão orientadas na direção NW-SE.

### **5. Caverna das Paredes de Couve-Flor**

Essa cavidade está situada na porção central do Lajedo do Rosário e tem entrada por pequeno lance vertical. Apresenta desenvolvimento horizontal em dois níveis, com padrão de galerias retilíneo e as dificuldade impostas à exploração são tetos baixos e rastejamentos.

As paredes e tetos são recobertas por espeleotemas do tipo couve-flor (de onde vem o nome da caverna), além destes, estão presentes estalactites. A caverna tem extensão linear de 38m e profundidade de 3,5m. A maioria das galerias estão orientadas para NE-SW, entretanto a galeria principal, de maior continuidade, apresenta direção para 13°Az e as demais em torno de 50Az°.

## 6. Caverna Craibeira

Localizada na porção centro-norte, tem entrada no topo do afloramento que destaca-se pela presença de uma grande árvore (craibeira), que facilita o acesso por lance vertical. A cavidade, de pequeno desenvolvimento, apresenta apenas um único salão com 19 m de extensão e 3,4m de profundidade. As dificuldades na exploração interna resumem-se à necessidade de rastejamento em alguns trechos com tetos baixos. O piso é predominantemente recoberto com blocos abatidos irregulares e os espeleotemas são pouco diversos (couve flor e estalactites de pequeno porte), porém conservados. Seu desenvolvimento é mais persistente na direção NE-SW (43°Az).

## 7. Caverna Desafio

A caverna Desafio, foco desta pesquisa, está localizada na porção sudoeste do lajedo e possui várias entradas, entretanto a principal é acessada por fratura, em pequeno lance vertical. Seu desenvolvimento é misto (predominantemente horizontal) e o traçado das galerias irregulares.

A cavidade apresenta extensão linear de 215,7m, profundidade máxima de 7,6m e dois níveis horizontais. As dificuldades internas de incursão são tetos baixos (e conseqüente rastejamento), blocos instáveis, trechos escorregadios e passagens em “quebra-corpo”, além da presença de marimbondos que impedem o prosseguimento em alguns pontos. Possui empoçamento de água de percolação e gotejamento, embora de forma intermitente.

O piso da caverna é coberto predominantemente com blocos abatidos cúbicos, entre 1 e 2m, e irregulares. Os espeleotemas são do tipo couve-flor e estalactites, ambos de pequeno porte e bem conservados. Os sedimentos inconsolidados ocorrem no piso e são caracterizados como argilas, já os sedimentos consolidados são encontrados nas paredes e nos tetos com conteúdo unicamente argiloso, mas também, em alguns setores, ocorrem com presença de conchas, indicando fluxo turbulento na deposição desse material.

As galerias mais persistentes se mostram irregulares, com vários trechos com orientações distintas, entretanto é possível notar que há uma tendência para a direção NE-SW.



## **8. Caverna Catedral**

Localizada na porção sudoeste, a caverna Catedral é acessada por lance vertical em fenda (entrada principal) e por dolina. Apresenta desenvolvimento horizontal e vertical, traçado dos condutos irregulares e salões amplos. As dificuldades de exploração estão relacionadas a grandes lances verticais, tetos baixos e trechos de rastejamento. Há presença de blocos irregulares dispersos. Seu desenvolvimento ocorre em dois níveis que se estendem por 218m lineares e sua profundidade máxima é de 8,3m.

A ornamentação é o principal atrativo da caverna (daí o nome catedral), constituindo-se em um dos principais conjuntos de espeleotemas do Estado. Há estalactites, cortinas, couve-flor e colunas de porte métrico, além de estalagmites, travertinos e escorrimentos calcínicos de menor porte. Sua galeria mais continua apresenta orientação de aproximadamente E-W.

## **9. Caverna Abissal**

A caverna Abissal está localizada também na porção sudoeste do lajedo, próximo a caverna Catedral, e sua entrada situa-se no fundo de uma fratura. Essa cavidade consiste de um volumoso salão que se conecta a outras galerias em cinco outros níveis, apresentando desenvolvimento predominantemente horizontal e traçado das paredes irregulares. As dificuldades encontradas na exploração são tetos baixos, trechos escorregadios, blocos abatidos instáveis e rastejamento. Há presença de blocos abatidos irregulares e de espeleotemas conservados dos tipos couve flor, Cortinas e dentes de cão, além de estalactites, estalagmites, escorrimento calcínicos e colunas estalagmíticas. Sua extensão total é de 170m lineares e 19,8m de profundidade.

Os condutos da caverna apresentam, em sua maioria, um desenvolvimento curvilíneo, apesar disso as mais persistentes tendem a ter orientações nas direções E-W e NE-SW.

## **10. Caverna Tuberculosa**

A caverna recebeu esse nome devido a um baú repleto de roupas e outros pertences abandonados em sua entrada. Na região é comum descartar os pertences de uma pessoa doente de tuberculose após sua morte.

Localizada a extremo leste do lajedo, essa cavidade apresenta desenvolvimento horizontal, padrão retilíneo dos condutos, extensão de 120m e profundidade de 5,8m. As dificuldades internas impostas à exploração são tetos baixos, rastejamentos, lances verticais, trechos escorregadios, blocos instáveis e passagens em “quebra-corpo”. É observada hidrografia intermitente e empoçamento de água de percolação. Há presença de blocos abatidos irregulares, tabulares e cúbicos. Os espeleotemas estão conservados, mas são pouco diversos: apenas estalactites (de pequeno porte e localizadas). As galerias mais persistentes da caverna apresentam desenvolvimento bem marcado nas direções N-S e NE-SW.

## **11. Caverna da Rolinha**

Localizada a extremo leste do lajedo, sua entrada é acessada por dolina de formato elíptico. A caverna da Rolinha apresenta desenvolvimento em maioria horizontal, salões amplos e irregulares, dois níveis que se estendem por 137m lineares e 8,4m de profundidade. As dificuldades internas impostas à exploração são tetos baixos, rastejamentos e lances verticais. Há blocos abatidos irregulares com diâmetro de até que 4m e os espeleotemas, todos conservados, ocorrem apenas na forma de couve flor e estalactites. Não é possível definir com clareza a orientação de desenvolvimento preferencial dessa cavidade.

## **12. Gruta do Chocalho**

A pequena Caverna Chocalho situa-se na porção centro-leste do lajedo e seu acesso é feito por uma grande fratura. Seu desenvolvimento é em maioria horizontal e o padrão das galerias é retilíneo. As dificuldades internas impostas à exploração são tetos baixos, rastejamentos e lances verticais. Há blocos abatidos irregulares, além de acúmulo de solos argilosos e arenosos em alguns pontos. Os espeleotemas estão conservados, mas são pouco diversos: apenas estalactites (de

pequeno porte e localizadas) e couve-flor são observados. A cavidade apresenta extensão linear de 29m, profundidade de 8,1m e desenvolvimento destacado na direção N-S.

### **13. Complexo Suíço**

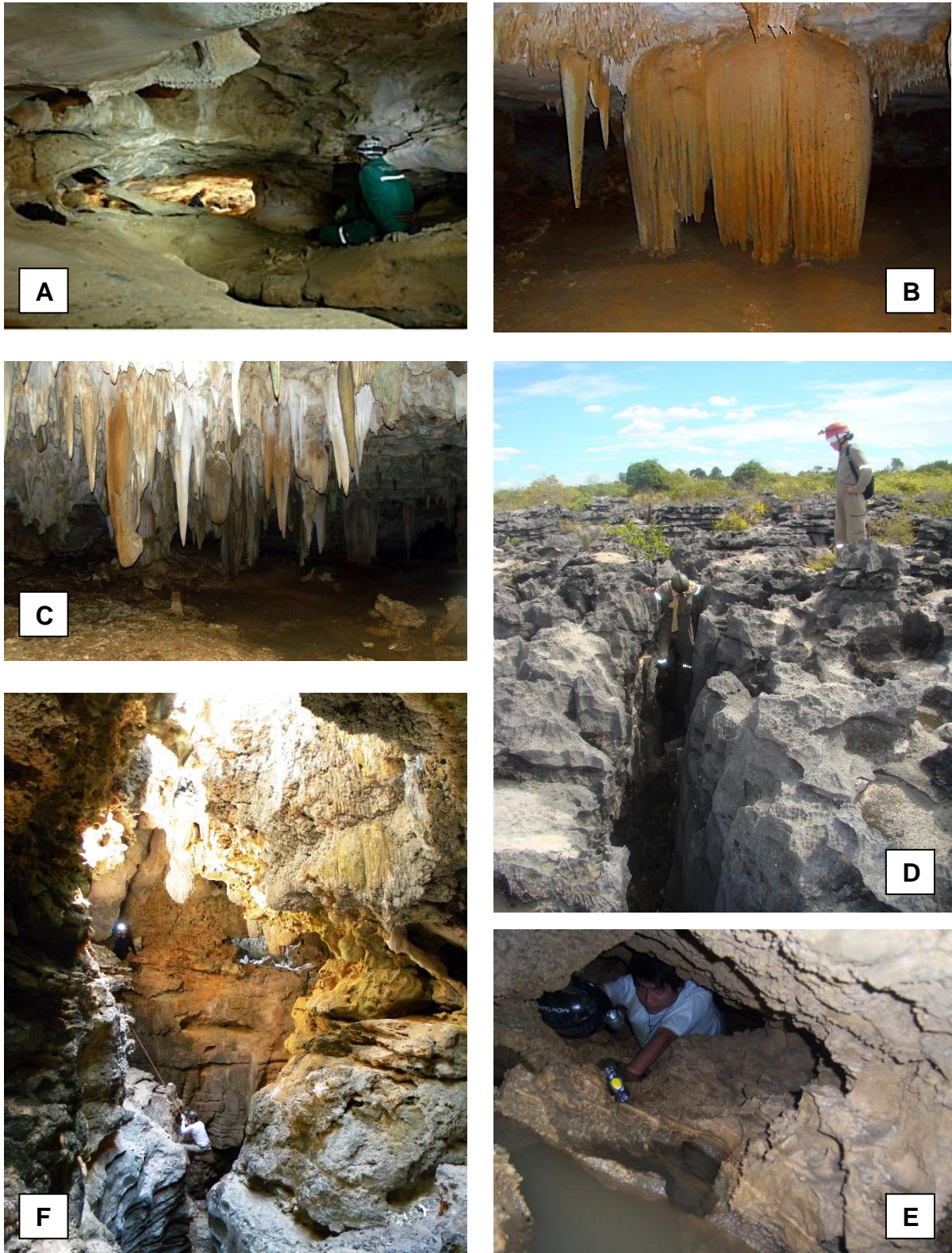
A Caverna Complexo Suíço, com uma extensão de 278m e profundidade de 14m, destaca-se por ser a maior cavidade natural do Lajedo do Rosário. O aspecto de suas galerias assemelha-se ao queijo suíço por apresentar diversas cavidades centimétricas, daí a origem de seu nome. Formada em dois níveis, a cavidade exhibe condutos e salões muito amplos e irregulares.

As dificuldades de exploração são tetos baixos, rastejamentos, lances verticais e trechos escorregadios. Encontra-se blocos abatidos irregulares, além de acúmulo de solos orgânicos e/ou argilosos principalmente em pontos próximos às entradas e no nível inferior. A caverna possui várias claraboias/fendas abertas, de forma que é predominantemente fótica (apenas alguns condutos laterais e o nível inferior apresentam porções afóticas). Os espeleotemas estão conservados, mas são pouco diversos: apenas estalactites (de pequeno porte e localizadas) e couve-flor são observados. E o conduto de maior persistência está orientado na direção NE-SW.

### **14. Caverna Ravina dos Corredores**

Essa caverna, localizada na borda leste do lajedo, encontra-se encaixada em um pequeno *canyon*. Seu desenvolvimento é predominantemente horizontal e suas galerias apresentam padrão retilíneo. As dificuldades de incursão são tetos baixos e trechos de rastejamento. A cavidade formou-se em dois níveis, apresenta 30m de extensão e 6,6m de profundidade. Não ocorrem espeleotemas. E as galerias mais contínuas estão orientadas na direção NE-SW e NW-SE.

Figura 16 - Cavernas mapeadas no Lajedo do Rosário.



Galeria da caverna Dona Tereza (a\*); Espeleotemas dos tipos cortina (b\*) e estalagmites (c\*) da caverna Catedral; Acesso por fratura (d\*\*) e teto baixo em conduto (e\*\*) na caverna Desafio; Descida para o interior da caverna Complexo Suíço (f\*\*\*). Fontes: \*Bento (2011b); \*\* Silva (2011); \*\*\* Santos & Cunha (2011).

## 7 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Este capítulo tem como objetivo a identificação e análise das descontinuidades tectônicas presentes na área de estudo com o intuito de verificar a influência destas no desenvolvimento de cavernas na Formação Jandaíra.

Para a caracterização das descontinuidades utilizaram-se imagens de satélite (Digital Globe) e Modelo Digital de Terreno (SRTM), mapas já existentes (ANGELIM *et al.*, 2006 e GALINDO *et al.*, 2012, BENTO *et al.*, 2011b), bem como informações coletadas “*in loco*”.

### 7.1 Análise das estruturas regionais

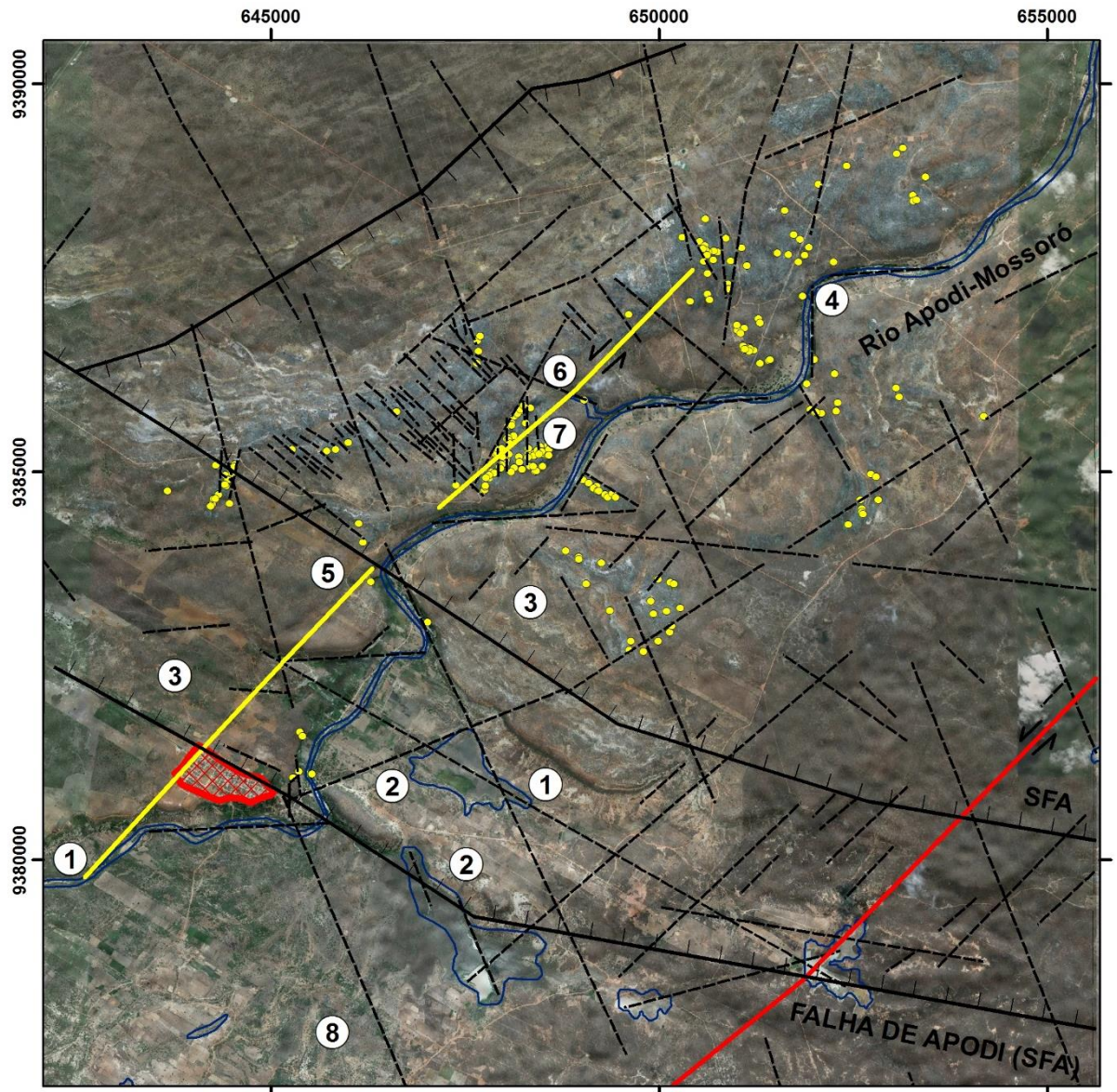
Em análise de cunho regional, a área de pesquisa é constituída de uma complexa trama de descontinuidades tectono-estruturais que controlam traços de drenagens e porções do relevo (Figura 17).

A área é recortada por três megaestruturas, que se prolongam por dezenas de quilômetros muito além dos limites da área de estudo, classificadas por Angelim *et al.* (2006) como falhas extensionais. Duas estão orientadas segundo a direção NW-SE e constituem o Sistema de Falhas de Apodi (SFA): a primeira, conhecida como Falha de Apodi, passa pela cidade de Felipe Guerra e segue pela porção mais arrasada tangenciando os dois morros testemunhos, a segunda (SFA), paralela à primeira, situa-se mais a norte. A terceira falha extensional apresenta um traçado irregular e direção NE-SW.

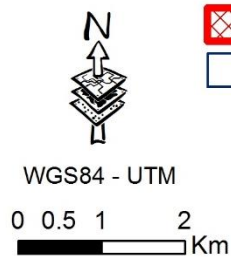
Hoerlle *et al.* (2007) descreve, em estudo geofísico, que a Falha do Apodi constitui uma falha lítrica com domínios de geometria simples e outros de rampa-patamar-rampa. Ao longo de toda a sua extensão ocorrem mudanças no ângulo de mergulho da falha e, nas porções sudeste e central, caracteriza-se um sistema de descolamento duplo. Na seção sísmica L7, ilustrada pelo referido autor, pode-se observar em profundidade o traçado da Falha Apodi e a sintética (SFA), subsidiária, situada a norte desta (Figura 18).












Entre os lineamentos NE-SW, segundo Galindo *et al.* (2012), encontram-se duas falhas, uma localizada na porção SE da área, classificada como falha transcorrente sinistral e outra, na porção central, classificada como falha transtracional sinistral encoberta da fase rifte.

Figura 17 – Mapa de descontinuidades tectono-estruturais da área de pesquisa.






### LEGENDA



-  Cidade de Felipe Guerra
-  Drenagem
-  Cavidades naturais
-  1-Escarpa
-  2-Morro testemunho
-  3-Chapada do Apodi
-  4-Canyon
-  5-Cachoeira do Roncador
-  6-Cachoeira da Caripina
-  7-Lajedo do Rosário
-  8-Planície Aluvionar

#### Estruturas maiores

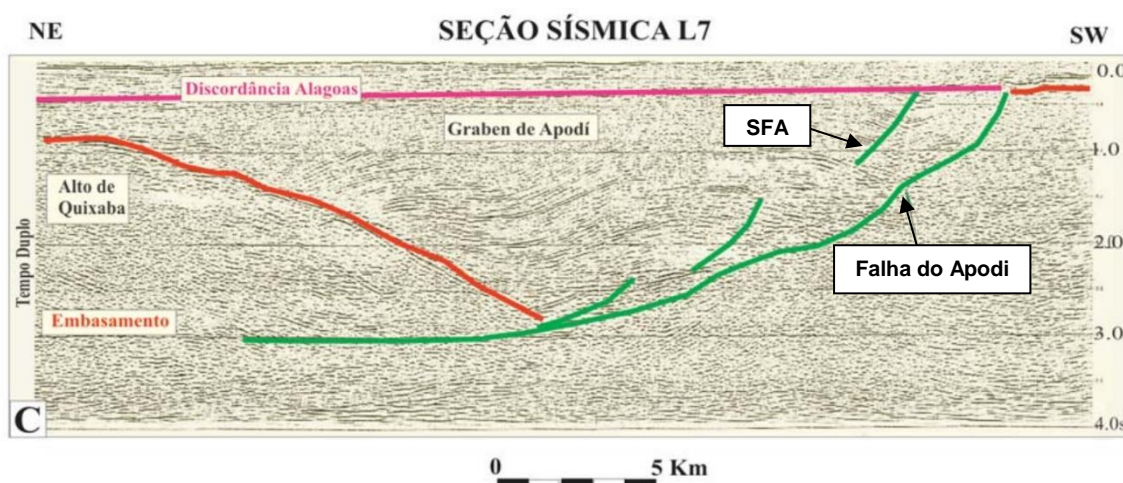
-  Falha Sinistral encoberta Fase Rífte
-  Falha extensional
-  Falha transcorrente sinistral

#### Estruturas menores

-  Lineamentos

\*Fonte: Digital Globe, SRTM, Angelim *et al.* (2006)

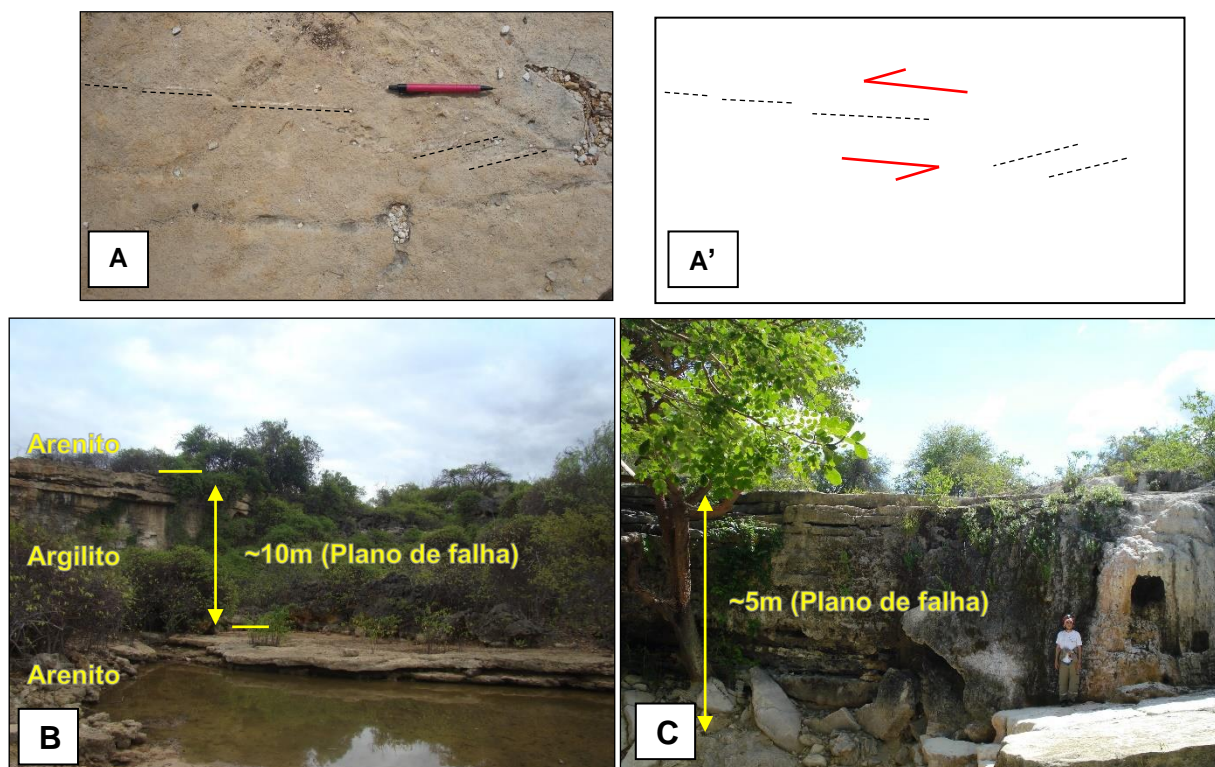
Figura 18 - Seção sísmica mostrando a Falha do Apodi e as falhas sintéticas subsidiárias.



Fonte: Hoerlle *et al.* (2007).

A falha transtracional sinistral NE-SW apresenta comprimento total superior a 12 quilômetros (embora em mapa esteja dividida em dois segmentos por interrupção topográfica) e situa-se na borda oeste do rio Apodi-Mossoró. Sua evidência em campo é verificada em planos de falhas verticais que configuram as paredes das cachoeiras da Caripina e do Roncador. Na porção superior da cachoeira da Caripina observam-se diversas fraturas, orientadas paralelamente ao paredão, fechadas e/ou preenchidas por calcita e dispostas em *en echelon*, indicando cinemática sinistral. A cachoeira do Roncador possui dois degraus topográficos, primeiro degrau é constituído de arenito no topo e o seu paredão (espelho de falha já citado) tem aproximadamente 10 metros de altura e expõe uma sequência pelítica da Formação Açú. O topo do degrau inferior é constituído também de arenitos e o seu paredão foi em grande parte erodido pela ação da queda d'água (13 metros). Não foi encontrada evidências de que o degrau inferior tenha sido formado por falha. A cachoeira da Caripina apresenta uma queda d'água (plano de falha) com cerca de 5 m de altura e encontra-se encaixada num pequeno *canyon* sinuoso com aproximadamente 500 m de comprimento e em média 40 m de largura, composto totalmente por calcário (Figura 19).

Figura 19 - Evidências em campo da falha transtracional sinistral NE-SW.



Indicação de cinemática em juntas preenchidas dispostas *en echelon* (a) (a'); Degrau superior da Cachoeira do Roncador (b); Cachoeira da Caripina (c)

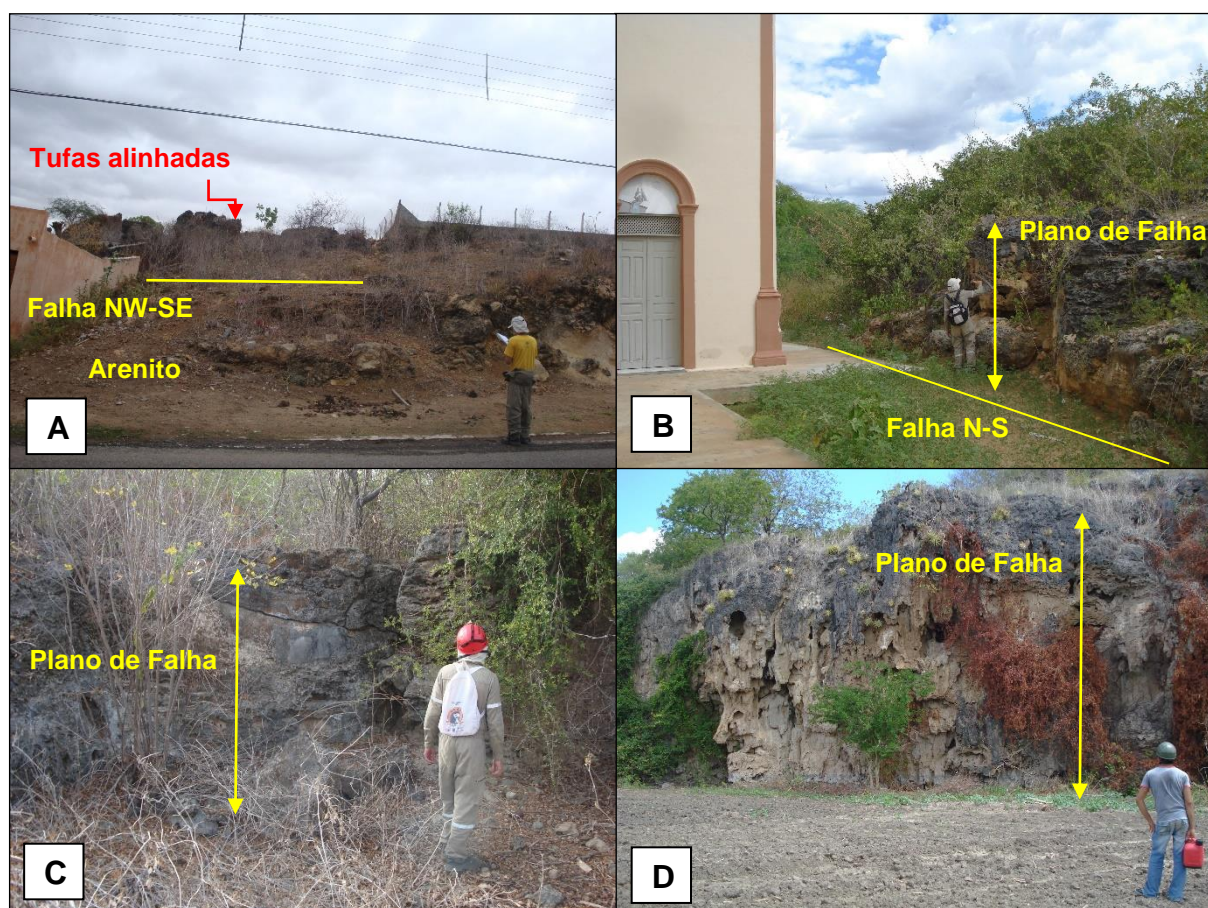
Fonte: do autor

Na cidade de Felipe Guerra ocorrem diversas fraturas evidenciadas por exposições de arenitos e tufas calcárias. Ao longo do final da avenida principal, observam-se arenitos em contato com tufas calcárias alinhadas segundo a direção NW-SE, coincidindo com a disposição da Falha do Apodi. Já ao lado da igreja encontra-se um afloramento de tufas, sotoposto ao arenito, expondo um plano verticalizado orientado segundo a direção N-S, esta estrutura se estende mais a norte até encontrar um grande depósito de tufas calcárias. Paralela a esta, encontra-se uma segunda estrutura N-S que está situada na escarpa do *canyon*. O desnível nas estruturas N-S indica movimentação normal de falha (Figura 20).



Este grande depósito de tufa encontra-se limitado por quatro descontinuidades, duas orientadas para NE-SW e duas para N-S. Barbosa (2013) aponta, que neste local, três cavernas se desenvolveram em depósitos de tufas no encontro de falhas normais com direção NE-SW e N-S. Segundo Reyes Pérez (2003), as tufas da região foram atingidas por sistema de falhas normais, onde apresentam-se paralelas a escarpa do vale do rio Apodi-Mossoró e foram controladas por falhas de idades pós-campanianas, que também afetaram a Bacia Potiguar.

Figura 20 - Tufas calcárias associadas a falhamentos.



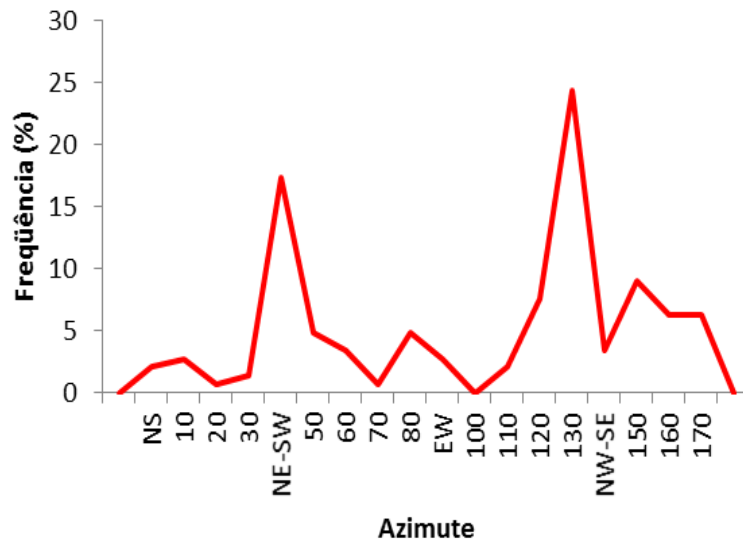
Alinhamentos de Tufas NW-SE sobre arenitos (a); Planos de falhas normais N-S (b, c, d). Fonte: Barbosa, 2013.

Fonte: do autor

Também destacam-se diversos outros lineamentos com padrões paralelos e subparalelos com diferentes orientações, totalizando 144 estruturas cartografadas. Para melhor entendimento estas foram divididas em quatro famílias com semelhante orientação espacial, segundo as direções N-S, E-W, NW-SE e NE-SW, nas quais

foram tratadas estatisticamente em histograma de frequência e diagrama de rosetas (Figura 21). As famílias de fraturas estão expostas em mapas individuais.

Figura 21 - Tratamento estatístico dos lineamentos regionais, totalizando 144 estruturas.



Histograma de frequência

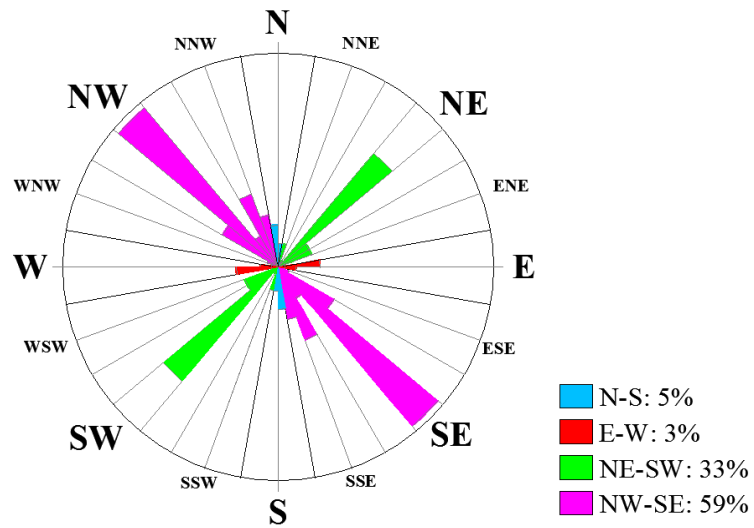


Diagrama de Roseta

Fonte: do autor

De acordo com a análise estatística, há maior representatividade para a família de lineamentos com orientação NW-SE, com 59% do total. Neste conjunto, os lineamentos com intervalo compreendido entre 130 e 140°Az apresentam uma maior frequência, com comprimentos não superiores a 2 quilômetros e localizam-se principalmente em afloramentos calcários do lado NW do Rio Apodi-Mossoró. Já os lineamentos compreendidos no intervalo 150-160°Az, que também destacam-se, são representados por estruturas mais persistentes, com até 7 quilômetros de extensão, que seccionam toda a área (Figura 22).

A família NE-SW, com 33% do total, é constituída, principalmente, de estruturas mais persistentes que localizam-se, em sua maioria, do lado NE do Rio Apodi-Mossoró. Estes lineamentos apresentam-se bem impressos, seccionando e bordejando grandes afloramentos calcários, bem como na escarpa da bacia. O intervalo de maior concentração desta família se dá entre 40 e 50°Az (Figura 22).

A família N-S, com 5% do total, concentra-se, principalmente, no Lajedo do Rosário e suas estruturas atingem no máximo 1 quilometro de extensão). E por último, os lineamentos E-W, que totalizam 3%, apresentam dois padrões: o intervalo compreendido entre 80 e 90°Az, que é constituído por estruturas com até 2,5 quilômetros de extensão e exibem disposição “*en echelon*”, controlando a sinuosidade de toda a extensão do *canyon* do rio Apodi-Mossoró; e as estruturas, entre 90 e 100°Az, com tamanhos superiores a 4 quilômetros (Figura 23).

Estudos tectônicos recentes realizados na Bacia Potiguar (e.g., BEZERRA & VITA-FINZI, 2000; BEZERRA *et al.*, 2001; NOGUEIRA *et al.*, 2006; MOURA-LIMA *et al.*, 2010; MAIA, 2012) relacionam deformações estruturais provocadas por diversos sistemas de falhas, sobretudo pelos Sistemas de Falhas de Afonso Bezerra (com trends NW-SE) e de Carnaubais (com trends NE-SW).

A família de lineamentos NW-SE, dentro dos limites da área de estudo, apresenta dois padrões principais de orientação que, possivelmente, foram gerados por eventos tectônicos distintos. Os grandes lineamentos, com direção 130-140°Az, segundo Galindo *et al.* (2012), ocorrem também em boa parte da porção SW da Bacia Potiguar. Por haver grande expressividade é provável que estas estruturas estejam relacionadas à reativação cenozóica do Sistema de Falhas Afonso Bezerra (CREMONINE, 1993). É observável, em mapa, que tais estruturas condicionam alguns canais de drenagem secundária. Já os lineamentos menores (*trend* 150-160°Az), que concentram-se em porções calcárias aflorantes, podem ter sido

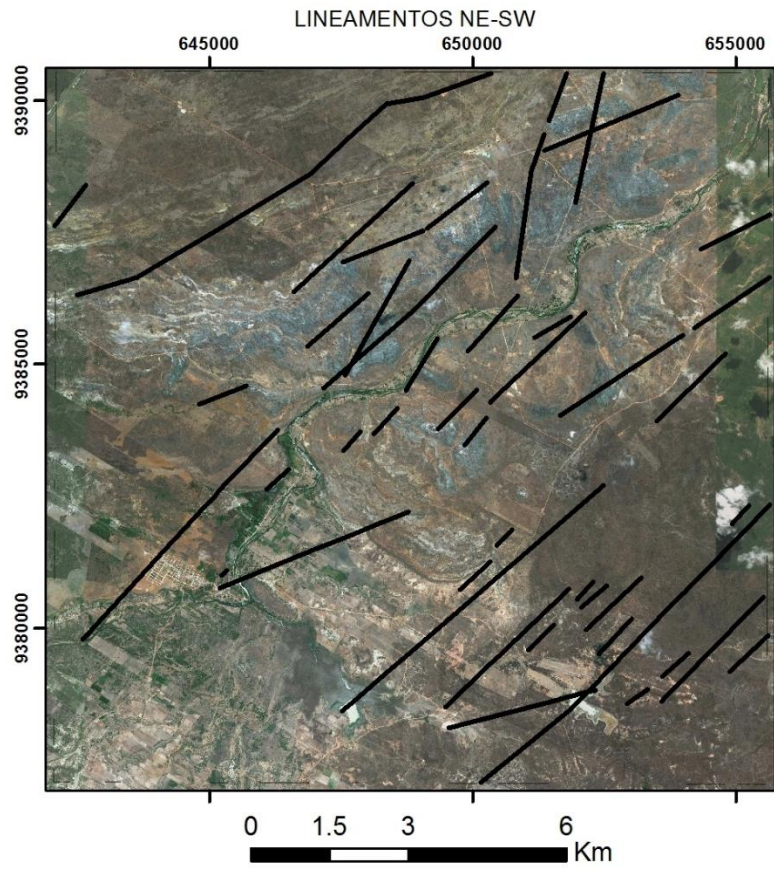
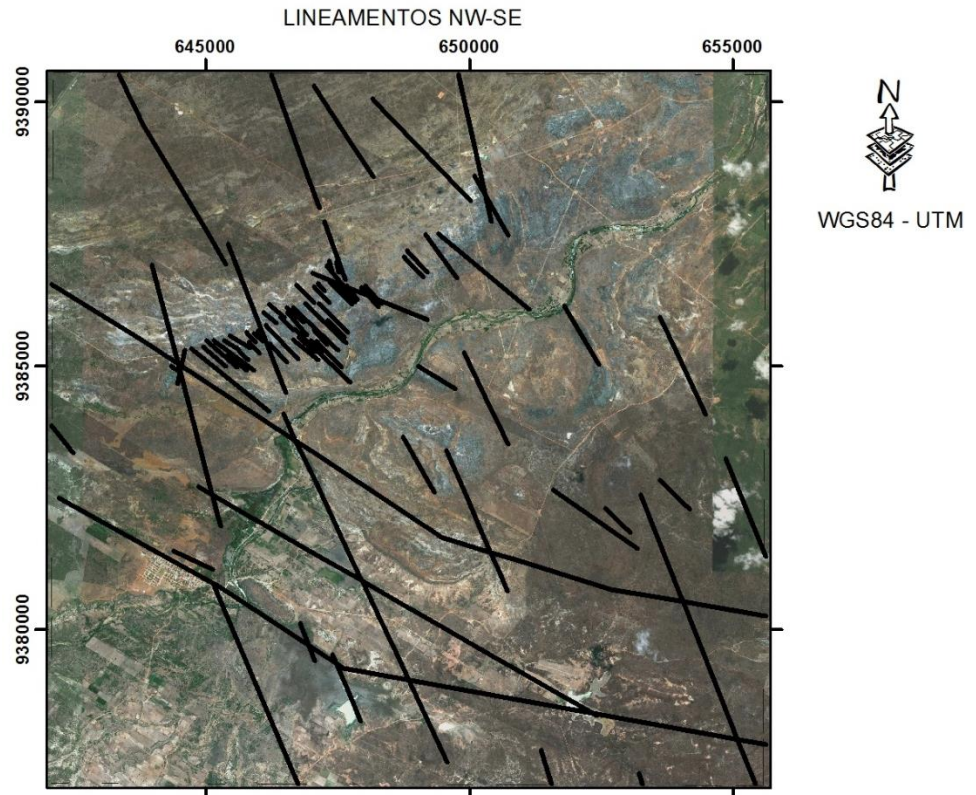
originados da propagação do Sistema de Falhas de Apodi, uma vez que, há uma coincidência na orientação dos mesmos.

O intervalo de maior concentração da família de lineamentos NE-SW apresenta orientação similar ao Sistema de Falha de Carnaubais (SFC). Então, sugere-se que estes lineamentos tenham sido originados a partir da reativação do SFC, cuja idade atribuída é miocênica ou mais recente (CALDAS et al. 1997a, CALDAS, 1997b e BEZERRA, 1998).

Lima et al (1990) sugere que o alinhamento NE-SW formado pela escarpa e pelo *canyon* do Rio Apodi-Mossoró pode ser uma das feições topográficas controladas pelo SFC.

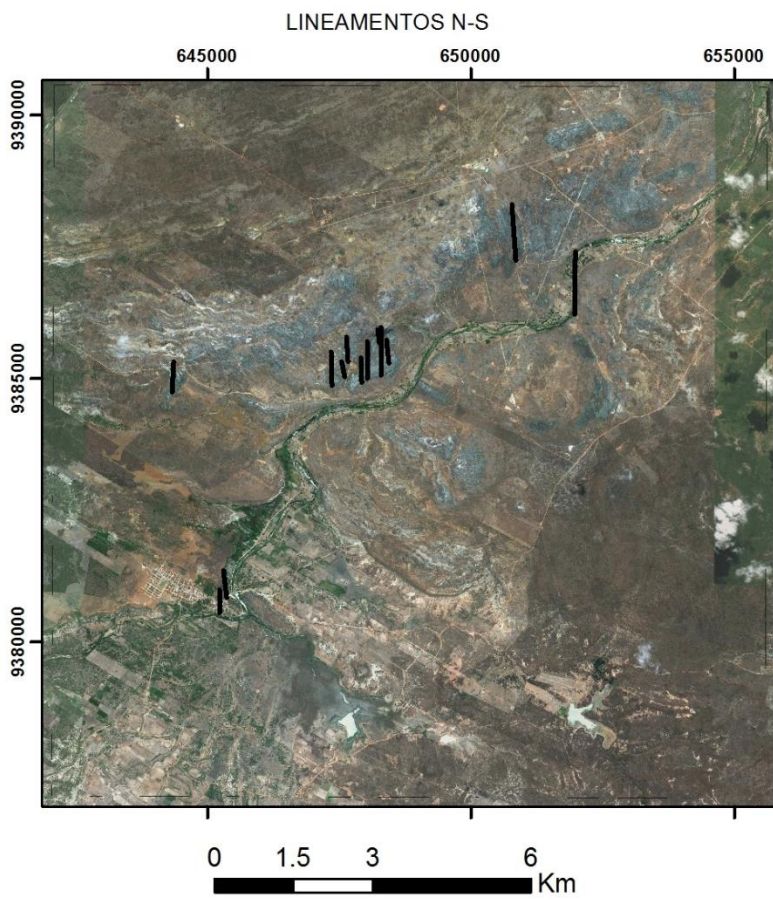
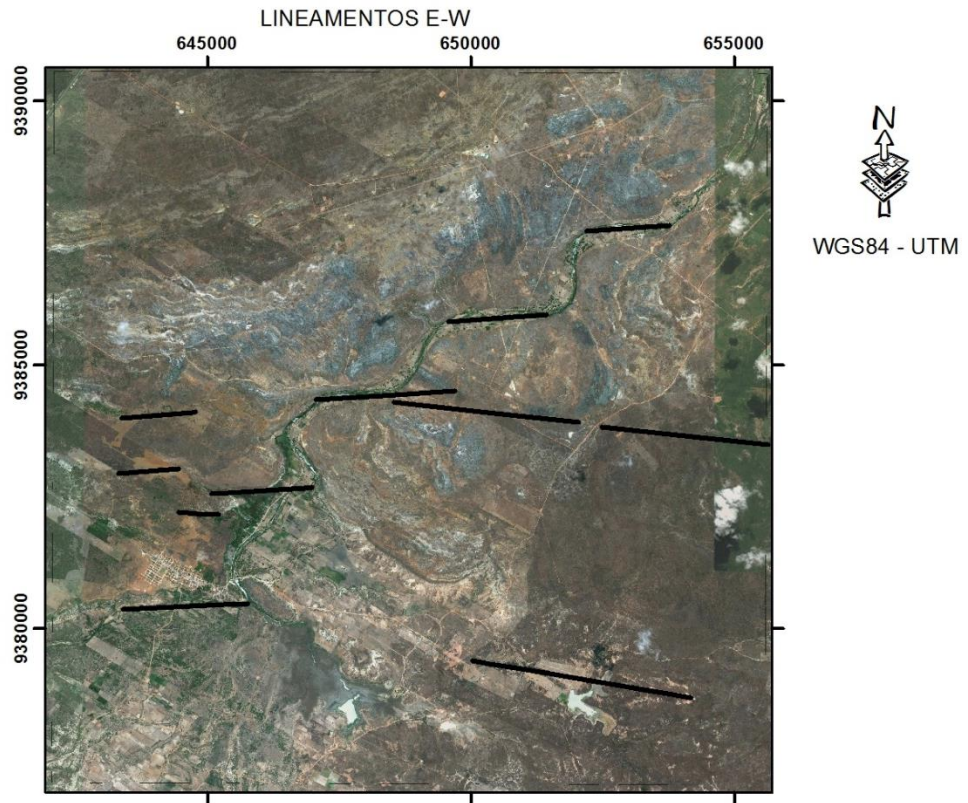
Maia (2012) argumenta que lineamentos e falhas de direção NE-SW são correlacionáveis com o SFC e que os lineamentos de direção NW-SE relacionam-se geneticamente ao sistema de falhas de Poço Verde e Afonso Bezerra. O autor acrescenta que estas falhas apresentam um forte indício no controle da orientação do rio Apodi-Mossoró e na deposição de depósitos quaternários (depósitos aluvionares antigos e depósitos de canal).

Figura 22 - Lineamentos regionais NW-SE e NE-SW.



Fonte: do autor

Figura 23 - Lineamentos regionais E-W e N-S.



Fonte: do autor

Outros autores, também, realizaram pesquisas similares anteriores de detecção de estruturas regionais nas imediações da cidade de Felipe Guerra. Cruz Junior (1996), através de interpretação de fotografias aéreas, traçou diversos lineamentos que em diagrama de roseta indicou dois intervalos principais, o N-S e o NW-SE (130-140°Az) e outro intervalo secundário NE-SW (30-40°Az). Moura (2004) traçou lineamentos da região com auxílio de fotografia aérea, imagens de satélite e radar, e, observou uma frequência mais significativa das estruturas com direção NE-SW e NW-SE.

## **7.2 Análise das estruturas do Lajedo do Rosário**

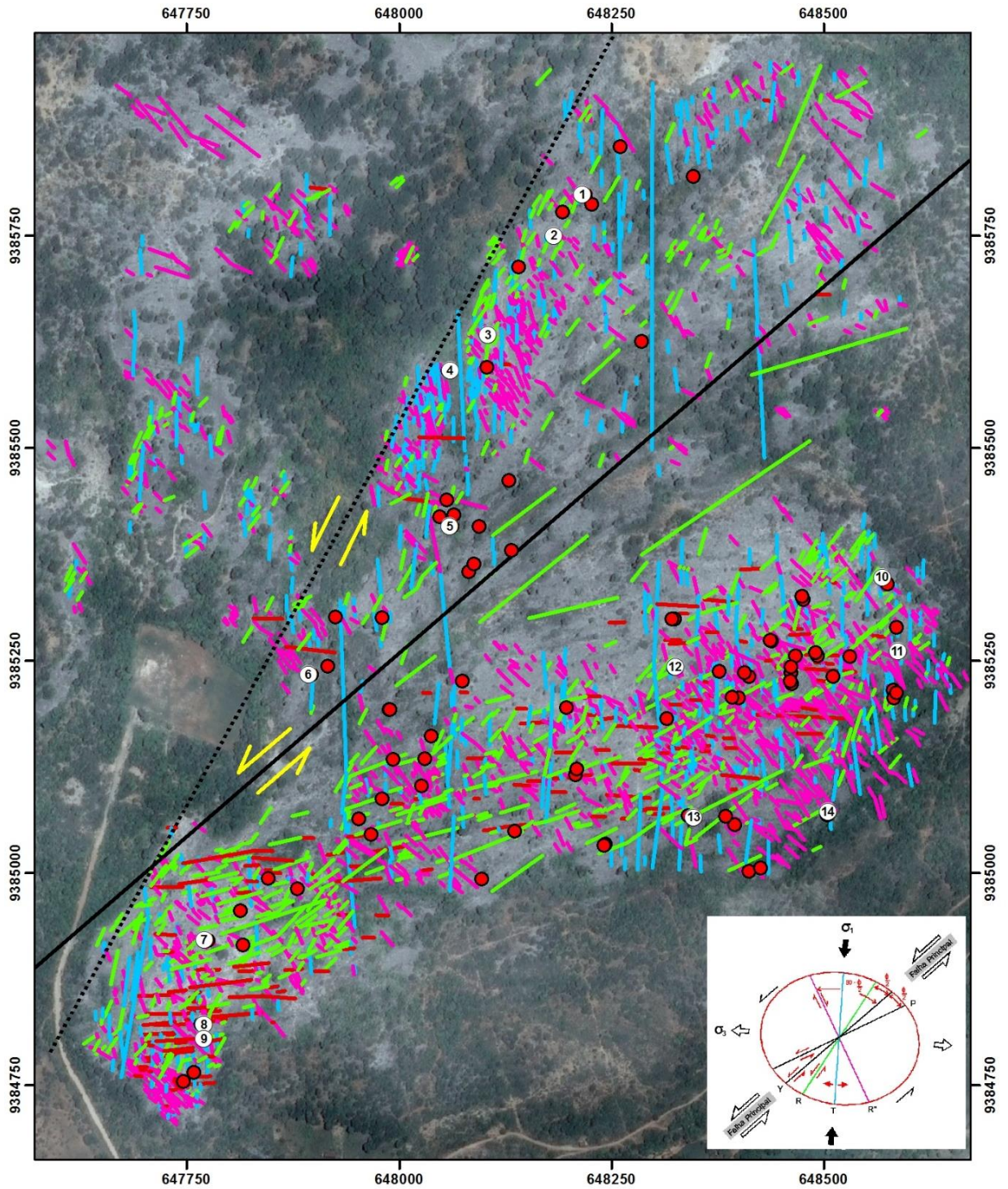
Neste item, deu-se atenção especial ao Lajedo do Rosário no que diz respeito a análise estatística das descontinuidades e sua comparação com o desenvolvimento de algumas cavernas e com as estruturas regionais, já detalhadas no item anterior. Estas foram digitalizadas através de imagens de satélite (Digital Globe) em escala de detalhe.

Outros autores, tais como Silva (2011), Santos e Cunha (2011) e Ramos Neto (2012) realizaram levantamentos e caracterização estrutural de setores no mesmo lajedo, que serão citados durante a descrição deste item.

### **7.2.1 Lajedo (*superfície*)**

A interpretação das imagens Digital Globe permitiu detectar feições lineares (lineamentos) distribuídas em boa parte dos afloramentos calcários (Figura 24). Estas foram vetorizadas e tratadas estatisticamente em histogramas de frequência e diagramas de roseta. Registraram-se 2724 descontinuidades, as quais exibem orientações e comprimentos variáveis.

Figura 24 - Estruturas cartografadas do Lajedo do Rosário.



- |                   |                                   |                                       |                                      |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Estruturas</b> | ○ Cavernas mapeadas / CECAV       | <b>Cavernas mapeadas</b>              | 8 - Caverna da Catedral              |
| — N-S             | ● Cavidades naturais / CECAV      | 1 - Furna Dona Tereza                 | 9 - Caverna Abissal                  |
| — NE-SW           | ..... Falha R' de Riedel          | 2 - Gruta do Filme                    | 10 - Caverna da Tuberculosa          |
| — E-W             | — Falha transtraccional sinistral | 3 - Caverna do Jefferson              | 11 - Caverna da Rolinha do Jefferson |
| — NW-SE           |                                   | 4 - Caverna do Tejo                   | 12 - Gruta do Chocalho               |
|                   |                                   | 5 - Caverna das Paredes de Couve-Flor | 13 - Caverna do Complexo Suíço       |
|                   |                                   | 6 - Caverna da Craibeira              | 14 - Ravina dos Corredores           |
|                   |                                   | 7 - Caverna do Desafio                |                                      |

WGS84

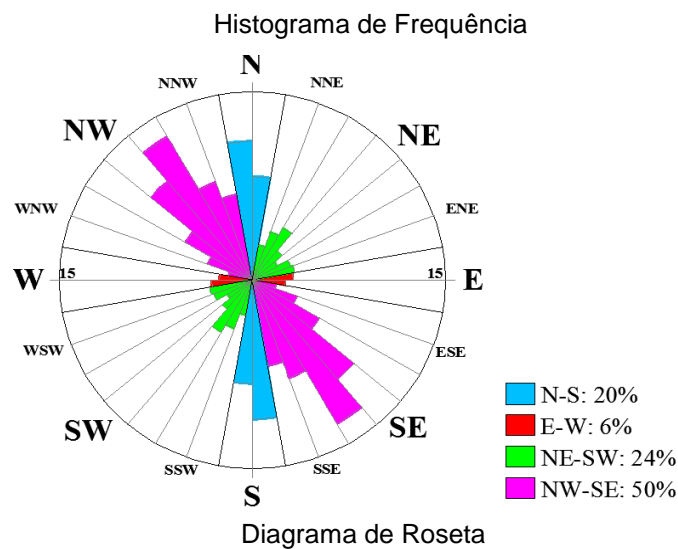
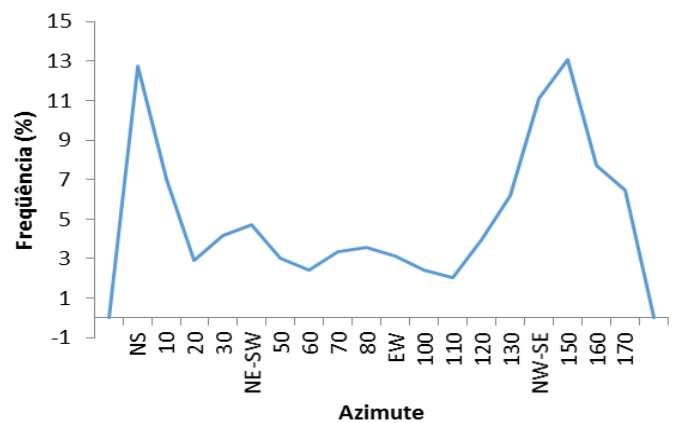
Fonte: Do autor



De acordo com a análise estatística, há um predomínio da família de descontinuidades orientadas NW-SE (50% do total). Neste conjunto, as fraturas incluídas no intervalo 140 a 150°Az estão em maior número, seguido do intervalo 130 a 140°Az. A família NE-SW (24% do total) apresenta disposição um pouco difusa, dentro de seu intervalo, e uma discreta concentração entre 20 e 40°Az. As estruturas N-S representam 20%, enquanto as E-W com 6% do total medido (Figura 25).

Nos gráficos percebe-se que as orientações dos intervalos de maiores significâncias das estruturas NW-SE, N-S e NE-SW, tomando como referência a falha transtracional sinistral NE-SW que secciona o lajedo, corroboram com o sistema cisalhante de Riedel com cinemática sinistral (Figura 26). Baseado nisto, pôde-se determinar suas classificações, tendências de movimentação cinemáticas e seus campos de tensões.

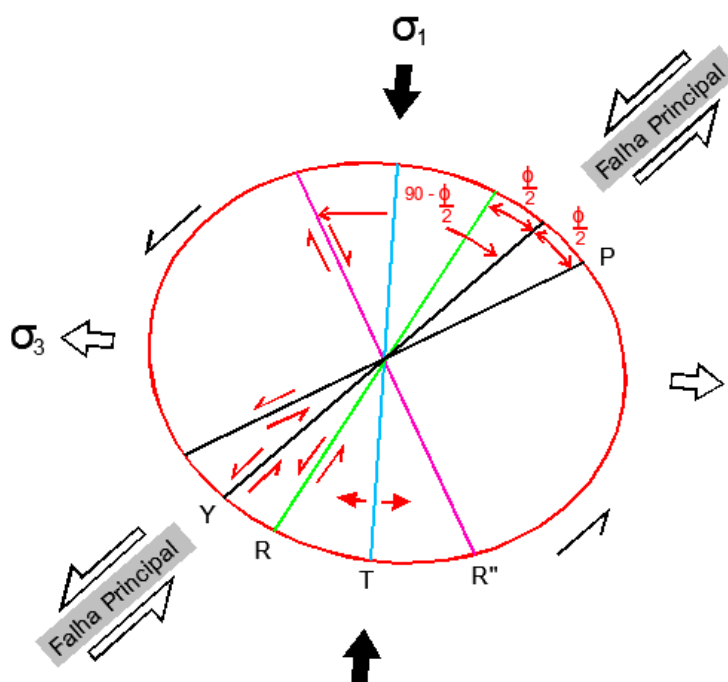
Figura 25 - Tratamento estatístico das estruturas do Lajedo do Rosário.



Fonte: do autor

Segundo o diagrama de Riedel, as estruturas de destaque NW-SE são classificadas como fraturas R'' que são potenciais falhas destrais (com sentido oposto ao cisalhamento principal). As estruturas N-S são classificadas como juntas de distensão T, que são visivelmente notadas na imagem de satélite em depressões alongadas ausentes de rochas e preenchidas com solo em meio aos afloramentos, caracterizando bem o movimento de abertura. A orientação das estruturas N-S está associada aos tensores de máxima compressão ( $\sigma_1$ ). E as estruturas NE-SW são falhas R' com cisalhamento idêntico ao principal (sinistral). Uma descontinuidade mais expressiva da falha R' de Riedel, cartografada regionalmente, também pode ser notada seccionando o lajedo. Os tensores de mínima compressão ( $\sigma_3$ ) apresentam direção E-W.

Figura 26 - Diagrama de Riedel com cinemática sinistral.



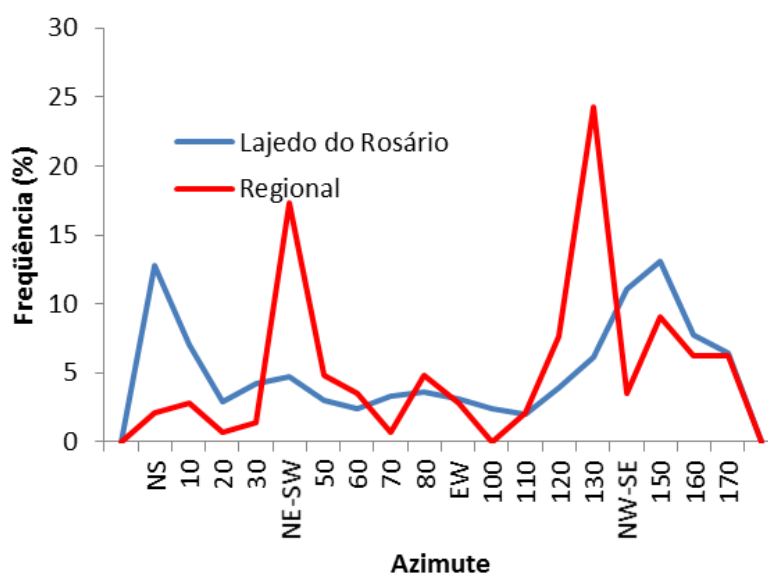
Fonte: Modificado de Bartlett *et al.* 1981 e Woodcock & Schubert 1994 *in* Davis *et al.* 1999.

Pequenas variações nas direções das estruturas mapeadas podem estar associadas a heterogeneidades locais na composição e nos planos de estratificação e na presença de estruturas herdadas.

Em estudo tectônico realizado no município de Felipe Guerra, Moura (2004) detectou, a partir de estilólitos tectônicos e grupos de falhas, que a compressão máxima de esforços da região apresenta direção em torno do eixo N-S subhorizontal, com variações tanto NE quanto NW, denominado como Campo 1. A autora verificou também a ocorrência de outro grupo de falhas compatíveis entre si, porém incompatíveis com o Campo 1 proposto. Este segundo grupo indicou direção máxima de esforços na direção 99° Az, denominado de Campo 2. Sendo assim, Campo 1 identificado por Moura (2004) corrobora com as tensões sugeridas no Lajedo do Rosário através do diagrama de Riedel.

O histograma abaixo mostra a comparação das estruturas regionais com as do Lajedo do Rosário (Figura 27). Como se pode observar, as estruturas N-S regionais são bem discretas, enquanto as do lajedo são mais frequentes. As estruturas regionais mostram concentrações na direção NE-SW (50°Az) e na direção E-W (80°Az), que não estão evidentes no Lajedo do Rosário. Já na direção NW-SE, as estruturas regionais destacam duas concentrações, uma de maior frequência orientada na direção 130°Az e outra de menor frequência na direção 150°Az, enquanto as estruturas do lajedo mostram maior frequência apenas na direção 150°Az.

Figura 27 - Histograma de frequência comparativo das estruturas – Lajedo do Rosário x Regional.



Fonte: do autor

Portanto, de acordo com o gráfico as maiores frequências das estruturas regionais e do Lajedo do Rosário não são coincidentes, com exceção das estruturas  $150^{\circ}\text{Az}$ . Baseado nessa observação, sugere-se que as descontinuidades mais frequentes do Lajedo do Rosário tenham sido originadas, principalmente, por influência de deformações tetônicas locais, conforme as estruturas de Riedel. Ainda no gráfico é possível notar que as estruturas do Lajedo Rosário ocorrem em diversas outras direções, originadas provavelmente a partir de deformações neotectônicas.

Para uma análise mais apurada dividiram-se as estruturas em mapas por orientação. A família de lineamentos NW-SE apresenta uma distribuição relativamente homogênea ao longo dos afloramentos (Figura 28). Os lineamentos N-S se distribuem de forma mais espaçada no lajedo, nos quais os mais persistentes têm tamanhos superiores a 200m com espaçamento lateral regular de aproximadamente 120m (Figura 29). As estruturas NE-SW concentram-se mais na porção sul do afloramento, juntamente com as descontinuidades maiores (Figura 30). Já as estruturas E-W, resumem-se, praticamente, na porção mais a sul do afloramento (Figura 31).

A porção sul do lajedo apresenta uma característica peculiar, ou seja, a mudança na direção das estruturas NW-SE exibe um traçado “sigmoide”. Ao longo do “sigmoide” (Figura 28) é possível observar várias estruturas dispostas *en echelon*, mas a orientação que sugere o movimento cisalhante destas, ora é dextral, ora sinistral. Isto contradiz o movimento teórico das estruturas R’ de “Riedel”, explicado anteriormente, que devia somente ser sinistral.

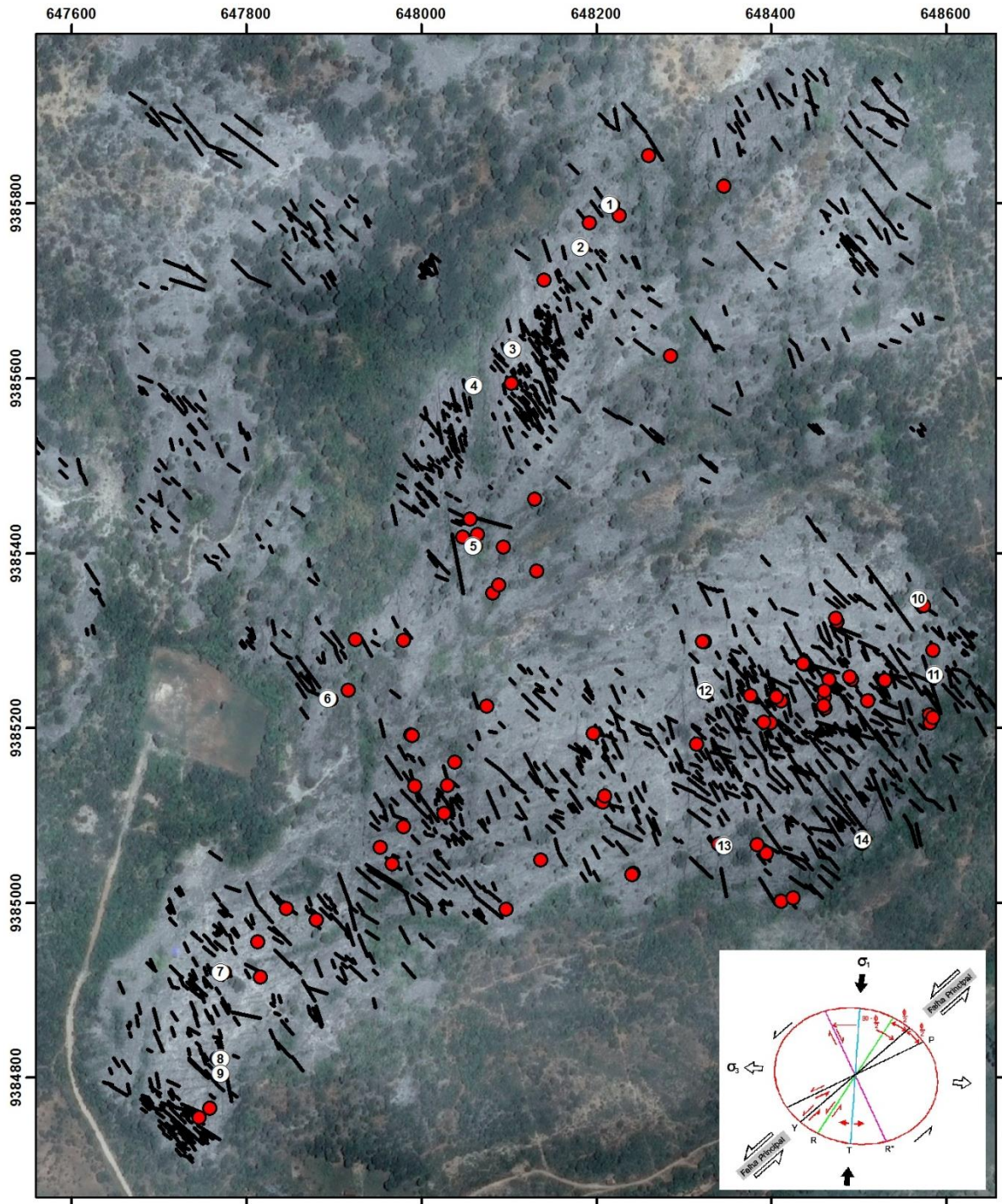
Em estudos de detalhe realizados no Lajedo do Rosário pode-se observar também a esta variação nas estruturas NW-SE *en echelon*. Silva (2011), na porção SW do lajedo, levantou estruturas em superfície com GPS geodésico em torno da caverna Desafio e estruturas em subsuperfície no interior da própria caverna. O autor notou que haviam juntas escalonadas na direção NE-SW que sugerem movimento dextral, ainda, acrescentou que o desenvolvimento da caverna se deu preferencialmente ao longo destas estruturas. Em mapa feito por Santos e Cunha (2011) que utilizaram o mesmo procedimento na porção SE do lajedo, em torno da caverna Complexo Suiço, observa-se que algumas estruturas NE-SW estão também escalonadas, mas, no entanto, sugerindo movimentação sinistral.

Para justificar a disposição oscilante das estruturas NW-SE *en echelon*, deve-se levar em consideração que em meio as descontinuidades contabilizadas incluem, além das estruturas de origem tectônica, as de origem atectônica. Por se tratar de um afloramento que situa-se a borda do canyon Apodi-Mossoró, há suscetibilidade a geração de fraturas por influência do “efeito de borda”, ou seja, com o abertura do *canyon*, por erosão, o alívio de pressão e a gravidade nas rochas marginais acaba por gerar tais fraturas. Sendo assim, o efeito de borda gerou no Lajedo do Rosário diversas fraturas que indicam falsos cisalhamentos tectônicos.

Houve, também, contribuições em pesquisas anteriores relativo a análise de estruturas no Lajedo do Rosário por meio de imagens satélite. Silva (2011) interpretou 140 fraturas, as quais as ENE predominam em relação às demais, as NW ocorrem em segundo lugar e por último vêm as N-S. Santos e Cunha (2011) traçou 283 descontinuidades, as quais as N-S tiveram predomínio e em seguida as NE-SW (50-70°Az).

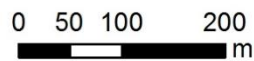
Por análise *in loco* por GPS geodésico, Silva (2011), em torno da caverna Desafio, obteve 106 dados de fraturas, sendo que a família ENE predomina em relação às demais, já a família NE ocorre em segundo lugar e a NW é a tem menor frequência. Santos e Cunha (2011), em torno da caverna Complexo Suíço, levantou 40 fraturas, as quais as de orientação NW-SE predominaram. Ramos Neto (2012), nas imediações da Caverna Catedral, tomou 101 medidas, onde a família de juntas E-W surge com o maior número de fraturas, enquanto a família de juntas N-S vem em segundo lugar.

Figura 28 - Estruturas NW-SE do Lajedo do Rosário.



○ Cavernas mapeadas / CECAV **Cavernas mapeadas**

● Cavidades naturais / CECAV



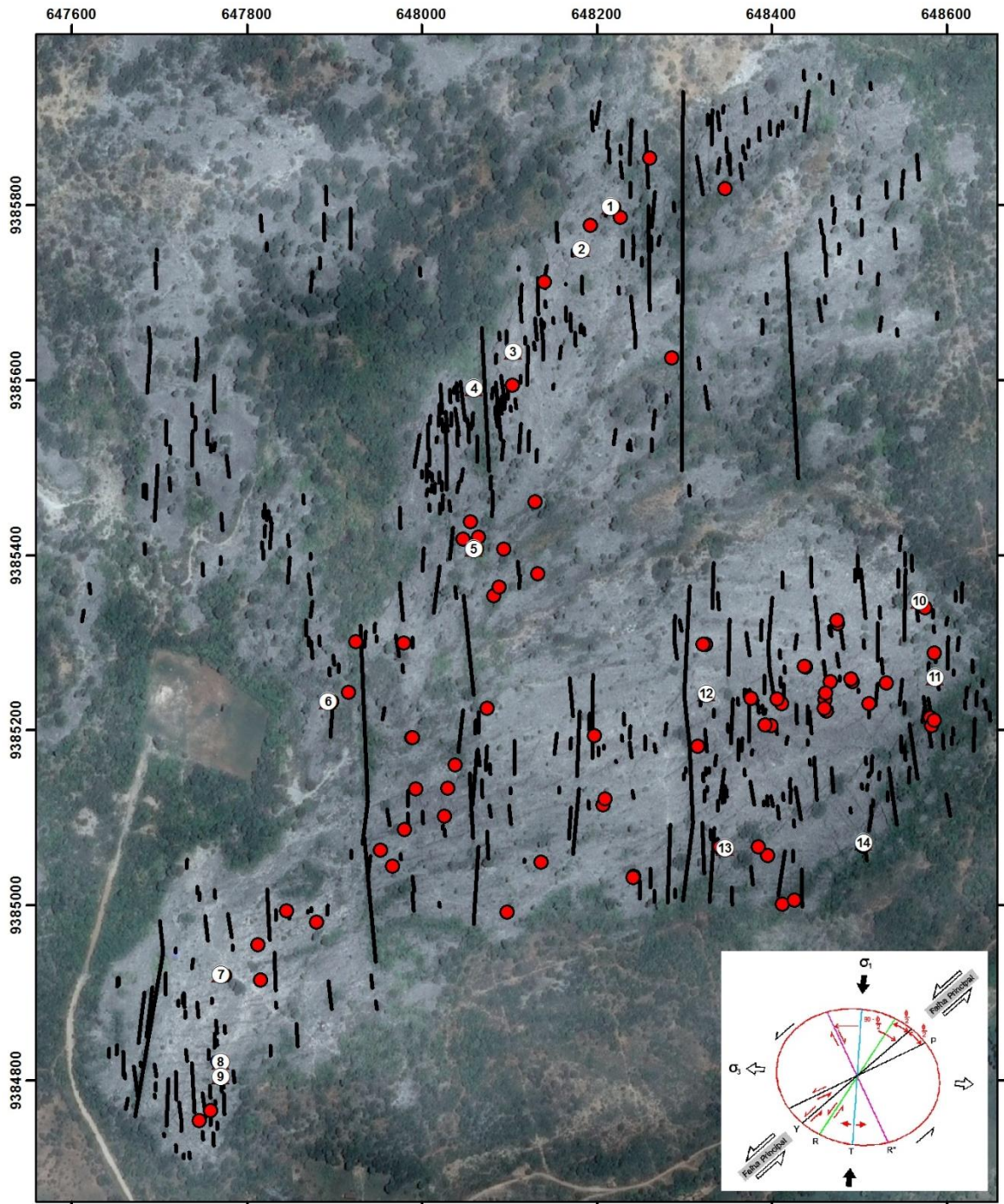
WGS84

- 1 - Furna Dona Tereza
- 2 - Gruta do Filme
- 3 - Caverna do Jefferson
- 4 - Caverna do Tejo
- 5 - Caverna das Paredes de Couve-Flor
- 6 - Caverna da Craibeira
- 7 - Caverna do Desafio

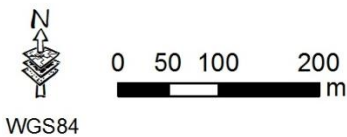
- 8 - Caverna da Cathedral
- 9 - Caverna Abissal
- 10 - Caverna da Tuberculosa
- 11 - Caverna da Rolinha do Jefferson
- 12 - Gruta do Chocalho
- 13 - Caverna do Complexo Suíço
- 14 - Ravina dos Corredores

Fonte: do autor

Figura 29 - Estruturas N-S do Lajedo do Rosário.

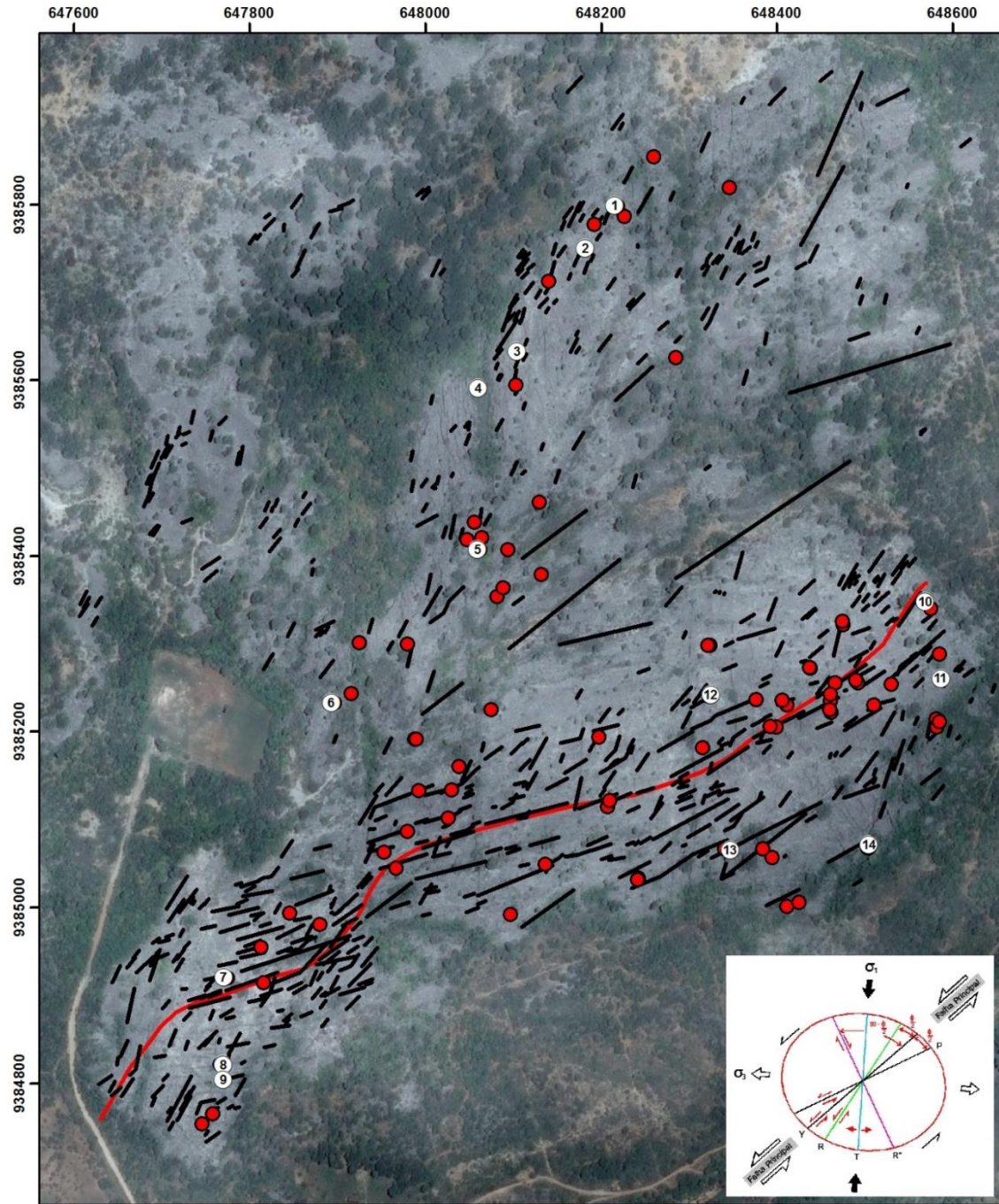


- |   |                            |                                       |                                      |
|---|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| ○ | Cavernas mapeadas / CECAV  | <b>Cavernas mapeadas</b>              | 8 - Caverna da Catedral              |
| ● | Cavidades naturais / CECAV | 1 - Furna Dona Tereza                 | 9 - Caverna Abissal                  |
|   |                            | 2 - Gruta do Filme                    | 10 - Caverna da Tuberculosa          |
|   |                            | 3 - Caverna do Jefferson              | 11 - Caverna da Rolinha do Jefferson |
|   |                            | 4 - Caverna do Tejo                   | 12 - Gruta do Chocalho               |
|   |                            | 5 - Caverna das Paredes de Couve-Flor | 13 - Caverna do Complexo Suíço       |
|   |                            | 6 - Caverna da Craibeira              | 14 - Ravina dos Corredores           |
|   |                            | 7 - Caverna do Desafio                |                                      |



Fonte: do autor

Figura 30 - Estruturas NE-SW do Lajedo do Rosário.



Cavernas mapeadas / CECAV  
 Cavidades naturais / CECAV  
 Arranjo sigmoidal das estruturas

N  
 0 50 100 200 m  
 WGS84

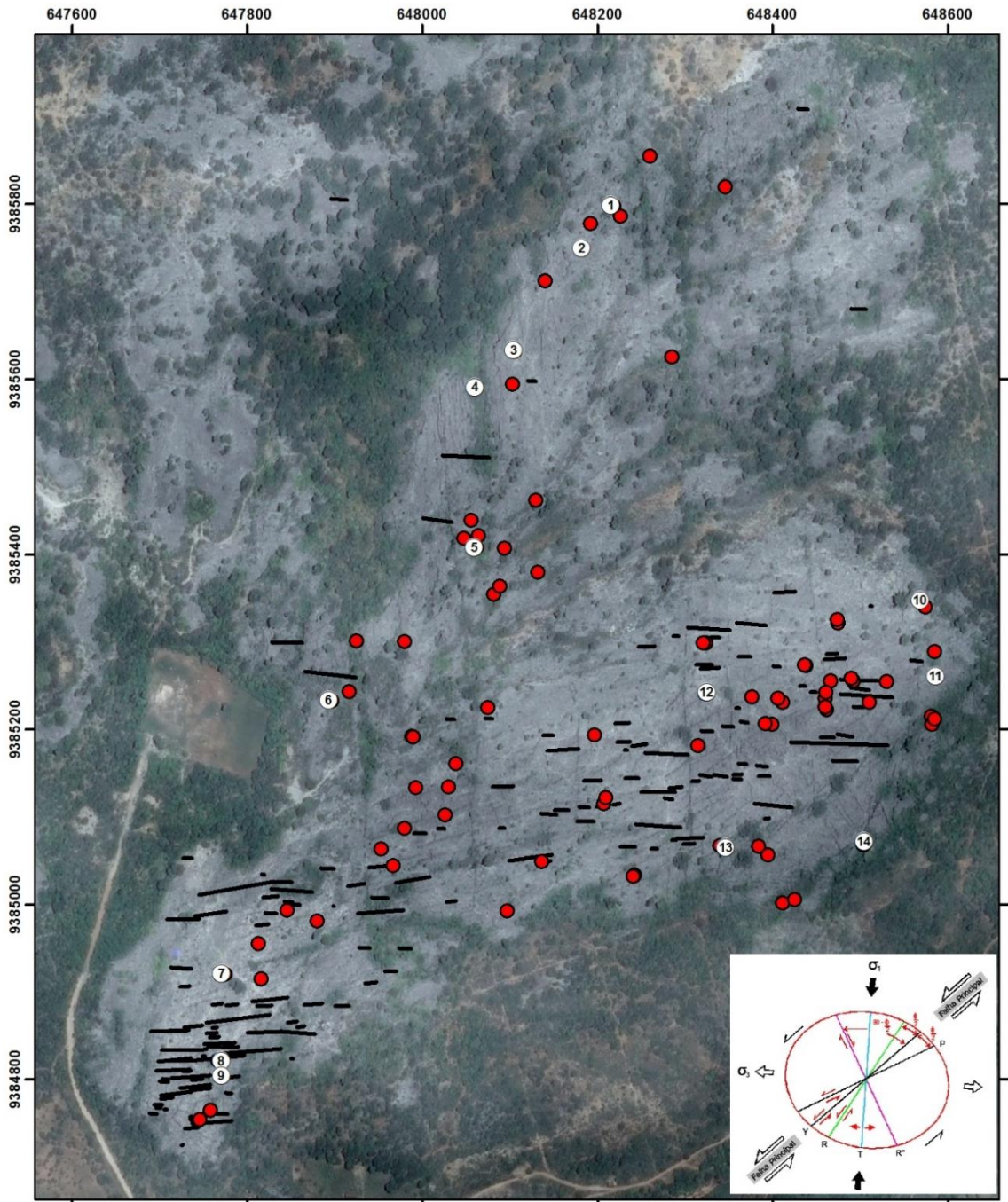
- Cavernas mapeadas**
- 1 - Furna Dona Tereza
  - 2 - Gruta do Filme
  - 3 - Caverna do Jefferson
  - 4 - Caverna do Tejo
  - 5 - Caverna das Paredes de Couve-Flor
  - 6 - Caverna da Craibeira
  - 7 - Caverna do Desafio

- 8 - Caverna da Catedral
- 9 - Caverna Abissal
- 10 - Caverna da Tuberculosa
- 11 - Caverna da Rolinha do Jefferson
- 12 - Gruta do Chocalho
- 13 - Caverna do Complexo Suiço
- 14 - Ravina dos Corredores

Fonte: do autor



Figura 31 - Estruturas E-W do Lajedo do Rosário.



○ Cavernas mapeadas / CECAV **Cavernas mapeadas**

● Cavidades naturais / CECAV

1 - Furna Dona Tereza

2 - Gruta do Filme

3 - Caverna do Jefferson

4 - Caverna do Tejo

5 - Caverna das Paredes de Couve-Flor

6 - Caverna da Craibeira

7 - Caverna do Desafio

8 - Caverna da Catedral

9 - Caverna Abissal

10 - Caverna da Tuberculosa

11 - Caverna da Rolinha do Jefferson

12 - Gruta do Chocalho

13 - Caverna do Complexo Suiço

14 - Ravina dos Corredores



0 50 100 200  
m

WGS84

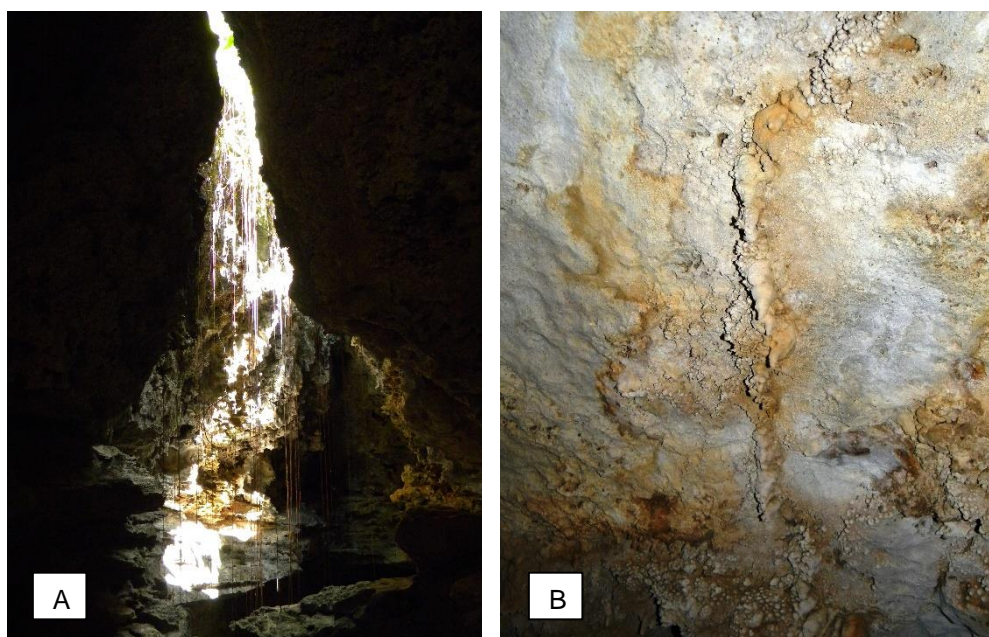
Fonte: do autor

### 7.2.2 Cavidades naturais (subsuperfície)

Para correlacionar a gênese das cavidades naturais presentes no Lajedo do Rosário com as discontinuidades regionais e locais, utilizou-se mapas de 14 cavernas confeccionados pelo LAGETEC/UFC em parceria com o CECAV (BENTO *et al.*, 2011b). Para tanto, foram contabilizadas, para cada caverna, orientações de fraturas já registradas em mapa e orientações de condutos, bem como informações de pesquisas anteriores. Estes dados foram tratados em diagramas de rosetas.

As discontinuidades são importantes na gênese de cavernas, pois estas condicionam a circulação da água e a dissolução da rocha, formando assim cavidades subterrâneas. Além disso, as discontinuidades formam nas cavernas uma série de feições associadas, tais como condutos orientados, mudança de direção das galerias, alinhamento de espeleotemas, dolinamento, etc (Figura 32).

Figura 32 - Feições em caverna condicionada por fraturas.



Caverna Complexo Suíço: conduto com abertura verticalizada para superfície (a); Espeleotemas (estalactites) desenvolvendo-se orientadas por fratura (b). Fonte: Santos e Cunha, 2011)

De acordo com as observações realizadas nos mapas das cavernas e na estatística de suas estruturas (Figura 33), fez-se os seguintes apontamentos:

- A **Furna Dona Tereza** apresenta predomínio de estruturas nas direções NE-SW e NW-SE, coincidindo com as direções de maior continuidade da caverna.
- A **Caverna do Filme** mostra em diagrama de roseta que há uma homogeneidade na orientação das estruturas, entretanto sua galeria de maior persistência está posicionada na direção N-S.
- A **Caverna do Jefferson** apresenta predomínio nas estruturas de direção NE-SW e a seus condutos mais extensos estão orientados para NW-SE e NE-SW.
- A **Caverna do Tejo** mostra na estatística que há um predomínio nas estruturas N-S, entretanto suas galerias mais contínuas estão orientadas segundo as direções NW-SE.
- A **Caverna das Paredes de Couve Flor** mostra um predomínio nas estruturas de direção NE-SW, coincidindo com a orientação das galerias mais extensas.
- A **Caverna Craibeira** está condicionada por uma única fratura na direção NE-SW.
- Silva (2011), que realizou mapeamento estrutural na **Caverna Desafio**, descreve que a maioria das estruturas presentes na cavidade estão orientadas segundo a direção E-W (ENE). Contudo, nota-se que o desenvolvimento da caverna se dá preferencialmente para a direção NE-SW. O autor acrescenta que os condutos estão posicionados de forma escalonada.
- Ramos Neto (2012), em sua pesquisa, enfatiza que na **caverna Catedral** as estruturas orientadas para E-W e NE-SW estão em maior número e que sua galeria de maior continuidade está orientada na direção E-W.
- A **Caverna Abissal** apresenta a maioria das estruturas variando entre NE-SW e E-W, coincidindo com a orientação das galerias mais persistentes.

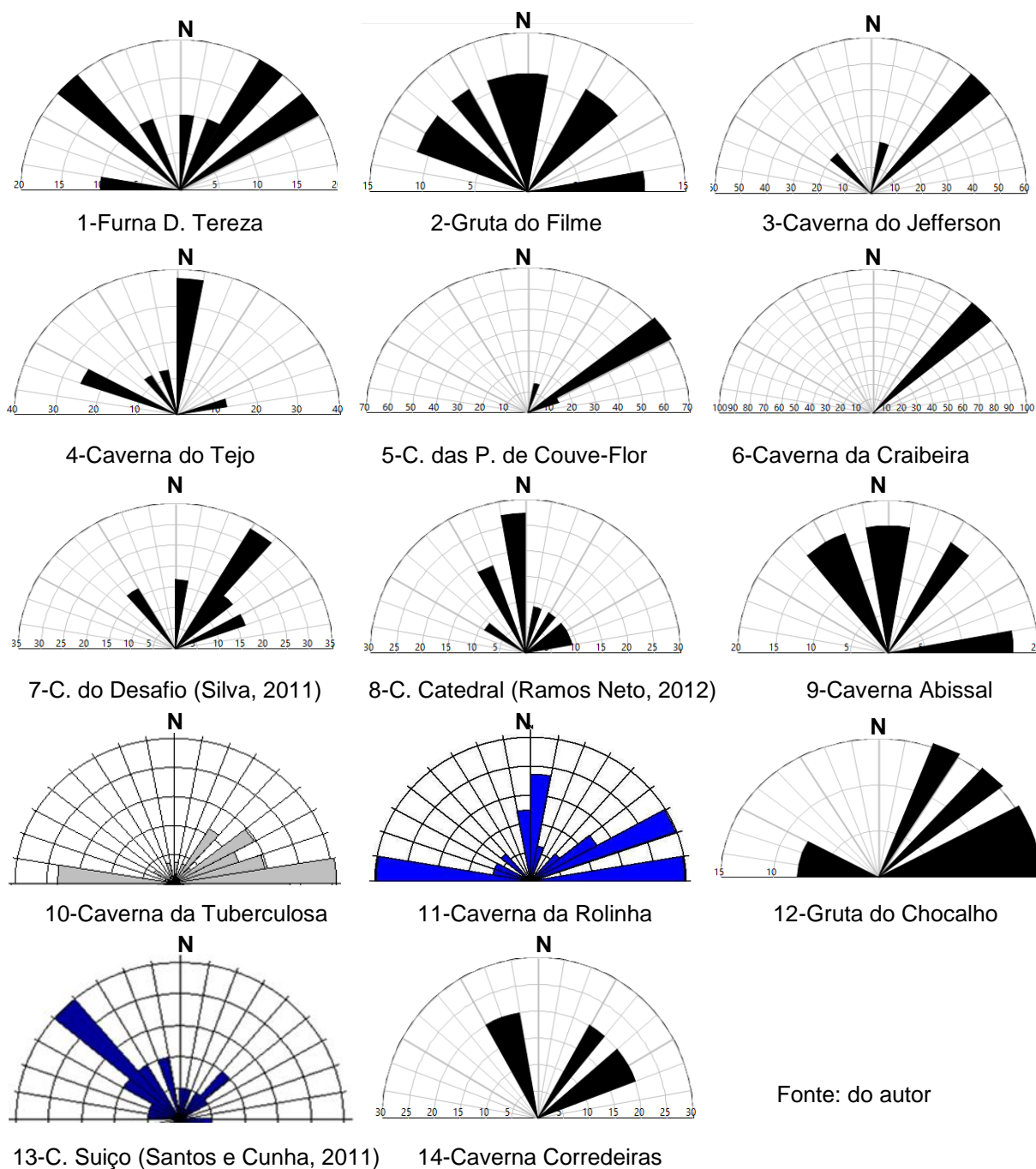
- A **Caverna Tuberculosa** apresentam estruturas predominantes na direção NE-SW e seus condutos mais extensos se mostram bem marcados nas direções N-S e NE-SW.
- A **Caverna Rolinha** apresenta em estatística que as estruturas N-S estão em maior número. Não é possível definir a direção preferencial da cavidade.
- A **Gruta do Chocalho** apresenta concentração das estruturas para N-S, coincidente com direção dos condutos mais contínuos.
- Segundo Santos & Cunha (2011) a **Caverna Complexo Suíço** apresenta um predomínio das estruturas orientadas para NW-SE. O conduto de maior persistência da cavidade esta orientado na direção NE-SW.
- A **Caverna Corredeiras** possui estruturas orientadas uniformemente para as direções NE-SW e NW-SE, coincidindo com a orientação das galerias mais extensas.

Conforme orientação preferencial das estruturas de cada caverna é possível destacar algumas observações. As estruturas das **cavernas do Jefferson, P. de Couve Flor e Craibeira** estão fortemente direcionadas para NE-SW (entre 40 e 50°Az). A coincidência angular sugere que estas descontinuidades tenham sido formadas a partir da deformação rúptil da Falha Transtracional Sinistral (falha Y de Riedel) que secciona o lajedo.

Já as **cavernas Desafio, Catedral e Abissal** apresentam maior destaque nas fraturas E-W. Estas cavidades localizam-se na porção SW do Lajedo do Rosário e coincidem com a concentração de estruturas de superfície E-W de maior continuidade. As estruturas da **Caverna da Rolinha e Gruta do Chocalho** apresentam maior concentração de estruturas na direção N-S, coincidindo com as juntas de distensão T de Riedel.

Observou-se, também, que podem ser gerados condutos com orientação distinta das fraturas. Esse fato pode ser observado nas fraturas traçadas por Santos & Cunha (2011) e Ramos Neto (2012), nas cavernas Complexo Suíço e Catedral, respectivamente, nas quais possuem descontinuidades E-W escalonadas e foram formados, a partir destas, condutos na direção NE-SW.

Figura 33 - Orientação das estruturas nas cavernas em diagrama de roseta.



Considerando os diagramas de roseta de todo o conjunto de cavernas, não é possível definir uma orientação preferencial das estruturas, isso possivelmente se deve a grande quantidade de descontinuidades presentes no Lajedo do Rosário. Mas o que pode-se ressaltar é que há mais de uma orientação de desenvolvimento em cada caverna, levando em consideração que muitos dos registros de descontinuidades tenham sido apagados durante a dissolução e do aumento dos

condutos (vazios) que as formaram. Essa característica leva a entender que a formação das cavernas não se limita a padrões preferenciais de orientação de estruturas, mas a relevância, neste caso, vem do cruzamentos das descontinuidades, principalmente, das aludidas estruturas NW-SE, NE-SW e N-S. Acrescenta-se ainda que além das descontinuidades geradas pela tectônica que contribuíram para a geração destas cavernas, existem também as descontinuidades atectônicas, geradas por colapso gravitacional (efeito de borda).

Entretanto, pode-se ressaltar que a maioria das cavernas possui condutos mais persistentes orientados segundo a direção NE-SW. A influência no desenvolvimento de condutos mais extensos está associada a Falha Transtracional Sinistral (falha Y de Riedel) que secciona o lajedo, que formou-se a partir da reativação do Sistema de Falhas Carnaubais.

## 8 CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS CARBONÁTICOS

A Formação Jandaíra é composta por uma sequência de estratos constituídos de mudstones a grainstones bioclásticos, intraclásticos e calcários litográficos, com intercalações de arenitos, folhelhos, margas e evaporitos (CORDOBA, 2001).

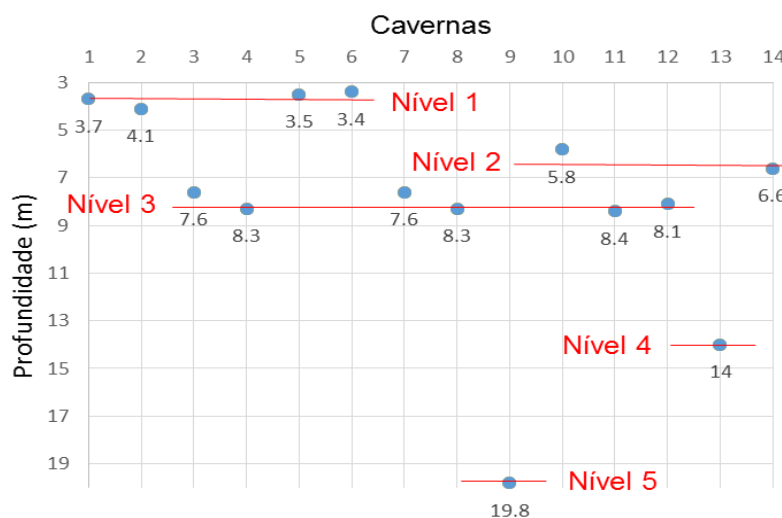
Sobre estas rochas modelou-se uma paisagem tipicamente cárstica que contempla feições tais como lapiás, dolinas, *canyon* e também cavernas.

Nos últimos anos diversas pesquisas sobre o carste Jandaíra, nos municípios de Felipe Guerra e Baraúna, foram realizadas com o intuito de caracterizar e estudar a gênese de algumas cavidades naturais (SANTOS & CUNHA, 2011; SILVA, 2011; RAMOS NETO, 2012; SANTOS, 2010; GOMES, 2008; e NASCIMENTO, 2010). Entre as diversas metodologias utilizadas estão incluídas: estudos de estratos carbonáticos envolvendo petrografia, análises químicas, difratometria de raios-x e ensaios laboratoriais.

Para melhor entendimento das cavidades naturais situadas no Lajedo do Rosário, construiu-se um gráfico a partir das profundidades máximas de cada caverna (Figura 34). A partir daí, notou-se que algumas cavidades apresentam profundidades equivalentes. Assim, separou-se 5 níveis máximos médios de formação das cavernas: Nível 1: 3,6 m; Nível 2: 6,2 m; Nível 3: 8,2 m; Nível 4: 14 m; e Nível 5: 19,8 m.

Os níveis 1 e 3 se destacam por apresentarem um número maior de cavernas, o nível 2 apresenta em apenas duas cavidades e os níveis 4 e 5 só foram encontrados em cada um deles uma caverna. A existência de níveis equivalentes pode estar atribuído a períodos diferentes de variação do nível freático ou até mesmo a fácies carbonáticas mais suscetíveis a formação de vazios.

Figura 34 - Profundidades máximas das cavernas e seus níveis equivalentes.



Fonte: do autor

Baseado nestas informações, este capítulo teve por objetivo caracterizar diferentes níveis carbonáticos através de análises e ensaios laboratoriais para determinação de fatores que possivelmente possam contribuir para a geração de cavernas no Lajedo do Rosário.

Essa investigação ocorreu nas proximidades da caverna Desafio, ao longo de uma fratura, onde estão expostos estratos bem definidos. Para tanto, foram coletadas 8 amostras de forma que representassem os estratos desde a superfície até o primeiro nível de desenvolvimento da caverna. Então, dividiu-se a investigação em 3 partes:

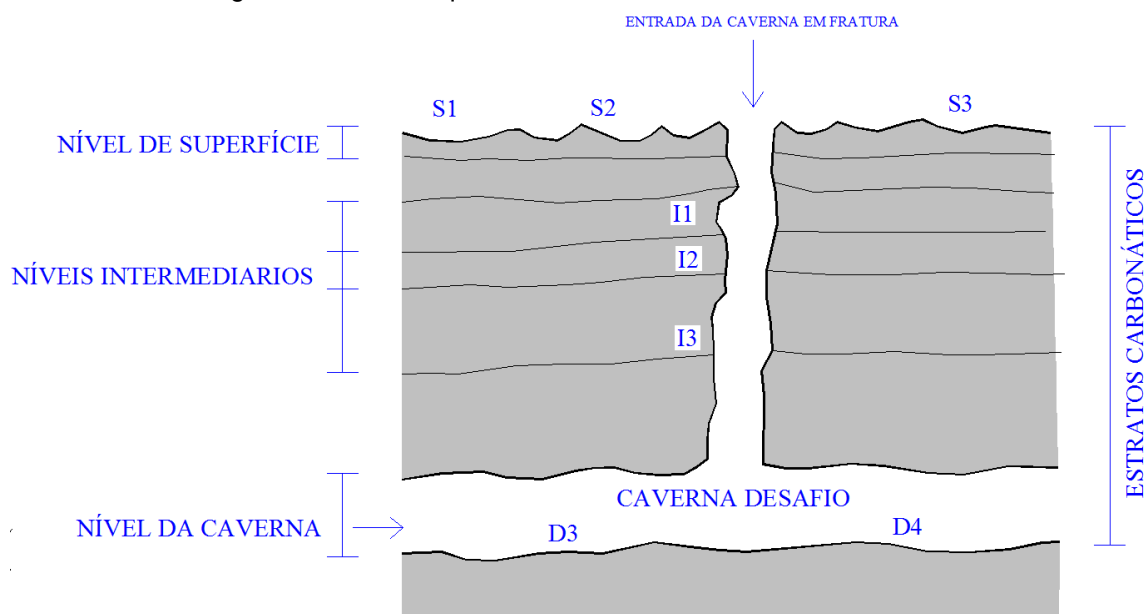
- O nível superior, localizado na superfície do lajedo e próximo a entrada caverna, é representado pelas amostras S1, S2 e S3, cujas coordenadas de localização são 647806/9384935, 647801/9384923 e 647806/9384930;
- Os níveis intermediários, situados entre a superfície e o nível da caverna são representados pelas amostras I1, I2 e I3 de coordenadas 647789/9384905, 647805/9384908 e 647790/9384902; e
- O nível da caverna, sendo constituído pelo nível mais raso das galerias da caverna Desafio, representado pelas amostras D3 e D4 de coordenadas 647714/9384914 e 647729/9384928, respectivamente.



Estes níveis estão distribuídas em profundidade da seguinte maneira:

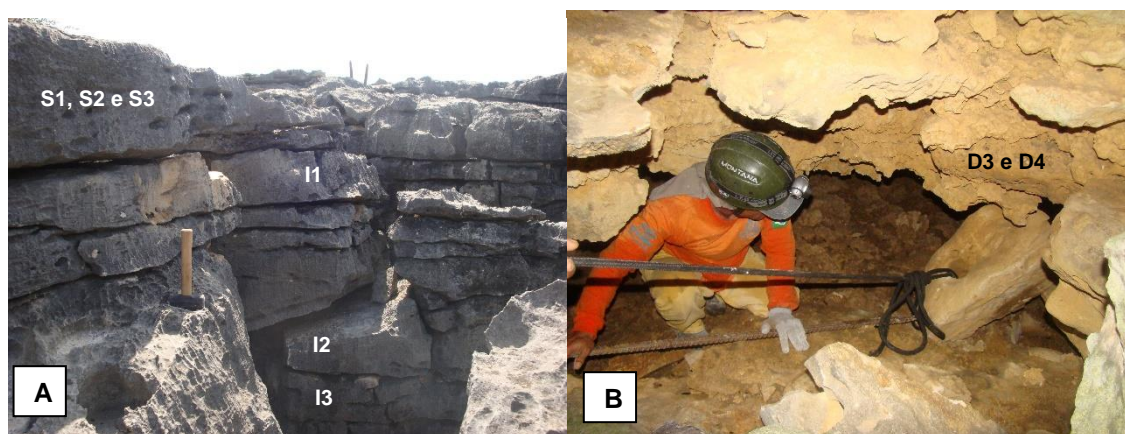
- Nível superior: Amostras S1, S2 e S3 (nível do solo – 0 m);
- Níveis intermediários: I1 (0,30 m), I2 (0,9 m) e I3 (1,20 m);
- Nível da caverna: D3 e D4 (8 m).

Figura 35 - Perfil esquemático do local de coleta das amostras.



Fonte: do autor

Figura 36 - Fotos dos níveis que representam as amostras coletadas.



A: Níveis superior e intermediários

B: Nível da caverna

Fonte: do autor

As etapas laboratoriais incluem: petrografia, determinação de índices físicos, ensaio de resistência à compressão uniaxial simples (ABNT, 2010), desgaste por abrasão (ABNT, 2012), ensaio de ataque químico, análises químicas e difração de raios-x.

## 8.1 PETROGRAFIA

### 8.1.1 *Nível superior*

#### 8.1.1.1 *Amostras S1, S2 e S3-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962)*

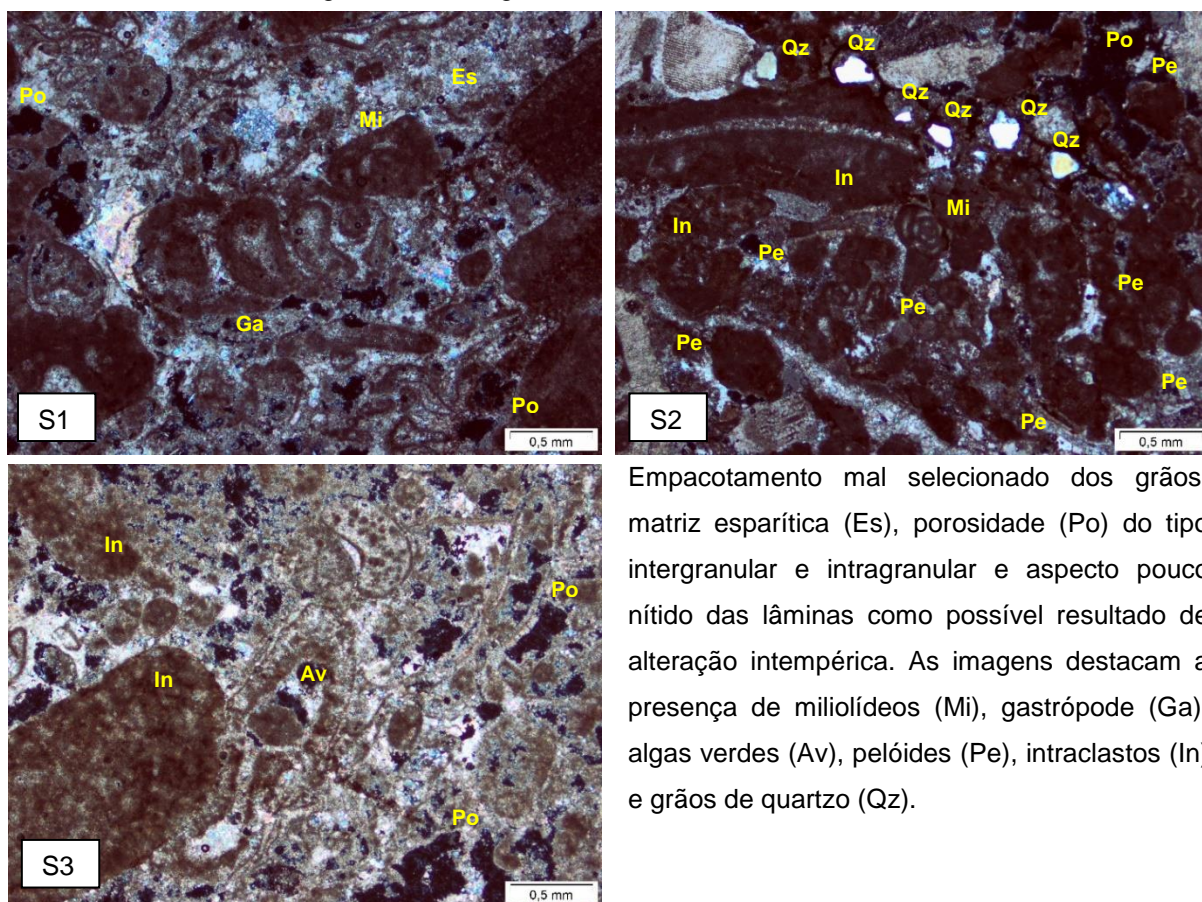
Este nível destaca-se por apresentar uma lapiezação proeminente, o que torna, assim, uma superfície muito irregular. Também, ressalta-se que este nível apresenta estratificações cruzadas métricas formadas por paleocorrentes com ângulos bem pronunciados e que sua dissolução acompanhou fortemente essas estruturas.

A rocha apresenta cor variando de creme a creme esbranquiçado e localmente cinza quando recoberta com fina capa de alteração. Em amostra de mão exibe abundância de microfósseis e discretas estruturas plano-paralelas de acamamento.

Em lâmina (Figura 37), este fácies expõe um empacotamento suportado pelos grãos, com cimento esparítico (com variações para micrito). Os aloquímicos são constituídos por grãos mal selecionados variando entre <0,1 a 3,0 mm, representados por bioclastos, oóides, pelóides e intraclastos. Entre os constituintes bioclásticos identificados encontram-se gastrópodes, miliolídeos, equinodermos, braquiópodes e algas verdes.

Os aloquímicos são compostos em sua maioria por micrita com porções esparíticas. As porosidades presentes são intergranular, intragranular e vugular e suas proporções são variáveis entre as lâminas (S1: 8%, S2: 1% e S3: 15%). Os materiais terrígenos, apenas observáveis na lamina S2, são o quartzo e a microclina, com tamanhos de até 1,5 mm, representando menos de 1%.

Figura 37 - Petrografia das amostras S1, S2 e S3.



Empacotamento mal selecionado dos grãos, matriz esparítica (Es), porosidade (Po) do tipo intergranular e intragranular e aspecto pouco nítido das lâminas como possível resultado de alteração intempérica. As imagens destacam a presença de miliolídeos (Mi), gastrópode (Ga), algas verdes (Av), pelóides (Pe), intraclastos (In) e grãos de quartzo (Qz).

Fonte: do autor

Os elementos presentes na lâmina possuem pouca nitidez, essas características juntamente com a alta porosidade podem ter sido resultado da alteração imposta pelos agentes intempéricos. Este estrato recebe exposição direta da incidência solar, o impacto direto das gotas de chuva, bem como constante trânsito de animais, o que acaba por acelerar sua alteração em relação aos estratos inferiores.

### 8.1.2 Níveis intermediários

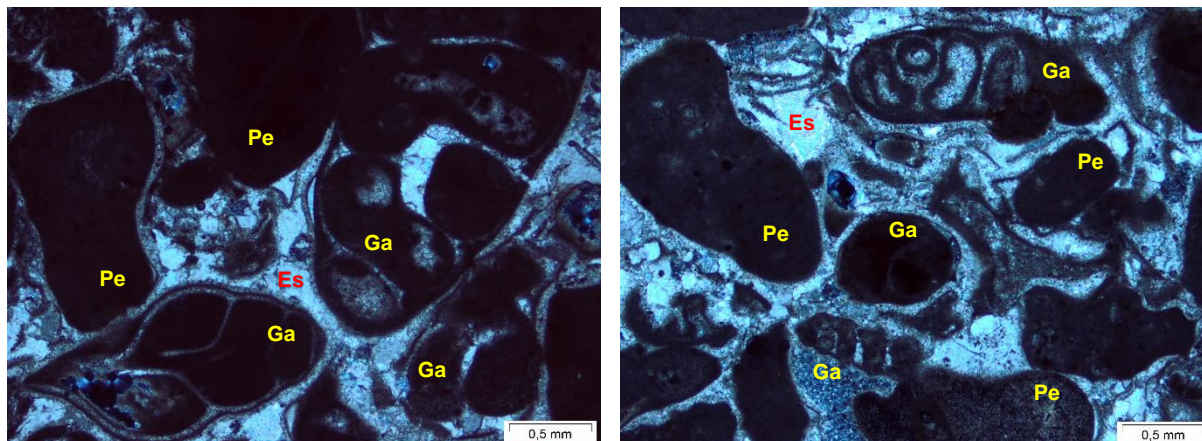
#### 8.1.2.1 Amostra I1-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962)

Este nível se encontra a aproximadamente a 30 cm de profundidade e apresenta marcas de paleocorrentes subhorizontalizadas. Sua coloração é creme e apresenta abundância em microfósseis e porosidade bem evidente.

Ao microscópio (Figura 38), a rocha exhibe um empacotamento suportado por grãos aloquímicos e cimento de calcita esparítica bem definida. Sua granulometria

varia de 0,3 a 3,0 mm, com predominância de grãos superiores a 1mm. Os constituintes aloquímicos presentes são bioclastos, pelóides e intraclastos.

Figura 38 - Petrografia da amostra I1.



Empacotamento de grãos, predominando tamanhos superiores a 1mm. Destacando-se a presença de gastrópodes (Ga), pelóides (Pe), matriz esparítica bem definida e porosidade inferior a 1%.

Fonte: do autor

Entre os bioclastos encontram-se gastrópodes e miliolídeos que internamente são constituídos por micrita, mas podendo ocasionalmente conter porções esparíticas. A porosidade representa menos de 1% em lâmina e é classificada como intragranular e intergranular.

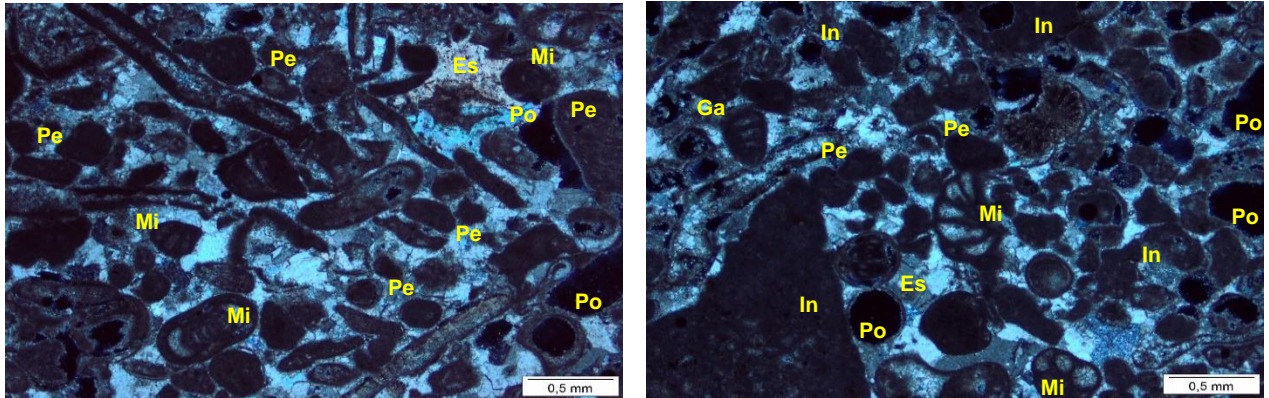
#### 8.1.2.2 Amostra I2-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962)

Este estrato está situado a 90 cm da superfície e exibe marcas de paleocorrentes com ângulos horizontalizados. Em amostra de mão observa-se coloração creme e poros bem abertos com até 2 mm de diâmetro.

Microscopicamente (Figura 39) o fácies apresenta textura suportada por aloquímicos em meio a cimento esparítico (com porções micríticas). Sua granulometria varia de <0,1 a 3,0 mm. Entre os grãos estão incluídos pelóides, bioclastos, oóides e intraclastos. Entre estes, os pelóides são os mais abundantes, com tamanhos normalmente inferiores a 0,3 mm. Neste estrato foram identificados fosseis de miliolídeos e gastrópodes.

A porosidade é pouco evidente, totalizando menos de 1% da lâmina e são do tipo intragranular, intergranular e vugular.

Figura 39 - Petrografia da amostra I2.



Empacotamento de aloquímicos, predominando pelóides (Pe) com até 0,3 mm, também observa-se presença Miliolídeos (Mi), Gastropodes (Ga), intraclastos (In), cimento de calcita espática (Es) e porosidade inferior (Po) a 1%.

Fonte: do autor

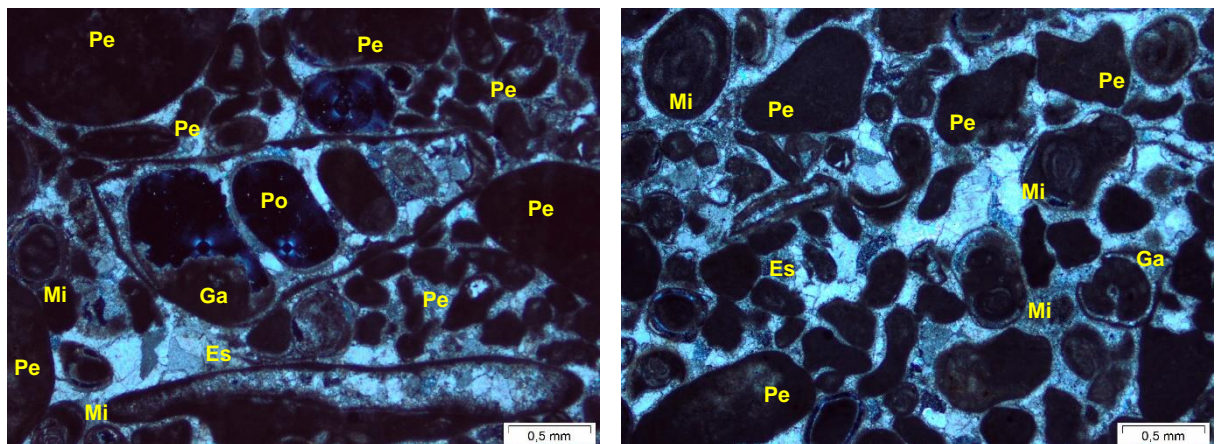
#### 8.1.2.3 Amostra I3-Biopelsparito/grainstone (Folk, 1962/Dunham, 1962)

Este facie está situado a 1,20 m de profundidade, exibindo cor creme e estratificação cruzada. Núcleos calcíticos milimétricos raramente são encontrados.

Em microscópio (Figura 40), também observa-se um arcabouço suportado por componentes aloquímicos em meio ao cimento de calcita esparítica e algumas porções micríticas. Os principais aloquímicos identificados são bioclastos (miliolídeos e gastrópodes), pelóides e oóides, que variam de 0,1 a 3,0 mm.

Alguns bioclastos maiores apresentam em seu interior cristais esparíticos. A porosidade intergranular e moldica ocupa menos de 1% da lâmina.

Figura 40 - Petrografia da amostra I3.



Aloquímicos suportados de até 3,0 mm com cimento esparítico (Es), presença de miliolídeos (Mi) e gastrópode (Ga). A porosidade (Po) é inferior a 1% em lâmina.

Fonte: do autor

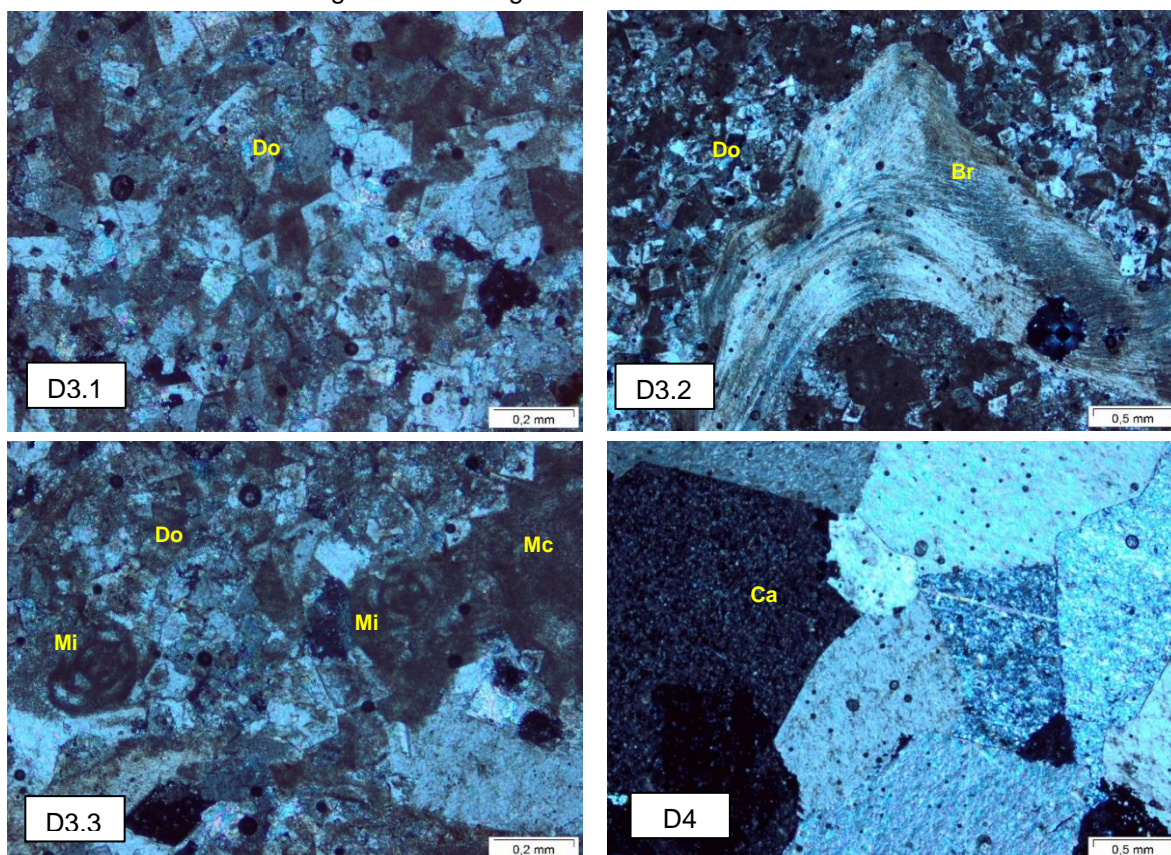
### 8.1.3 Nível da caverna

#### 8.1.3.1 Amostras D3 e D4-Dismicrita/Carb. cristalino(Folk,1962/Dunham,1962)

O fácies que correspondente ao nível da caverna, ao longo dos condutos e galerias, mostra uma aparência rugosa (cavernosa), com grande número de cavidades centimétricas preenchidas ou não por núcleos calcíticos (geodos). Em amostra de mão, apresenta um aspecto maciço e coloração acinzentada, com presença ocasional de núcleos calcíticos milimétricos. Este fácies está situado a 8 metros da superfície.

Em lâmina delgada (Figura 41), o fácies é constituído por mosaico de cristais idiomórficos e subdiomorficos de dolomita, com seção romboédrica característica. Não é raro encontrar porções de matriz micrítica de calcita e cristais de dolomita turvos, por conter quantidades significativas de inclusões micríticas.

Figura 41 - Petrografia das amostras D3 e D4.



Textura cristalina com presença de cristais subdiomórficos e idiomórficos de dolomita (Do), presença de miliolídeos (Mi) e fragmentos de braquiópodes (Br), porções de matriz micrítica (Mc) e mosaico de calcita (Ca).

Fonte: do autor

Esses cristais formaram-se possivelmente por processo de dolomitização, nos quais cristais micríticos de calcita recristalizaram como dolomita em cristais com tamanho não superiores que 0,1 mm. Portanto, este fato sugere que o fácies originalmente representado por um mudstone evoluiu para um carbonado cristalino (por dolomitização) durante o processo diagenético.

Destacam-se campos que contêm mosaico de cristais de calcita subdiomórficos, com tamanhos superiores a 3,0 mm, sendo estes os mesmos núcleos calcíticos observáveis a olho nú. Ainda é possível encontrar bioclastos reliquiares tais como miliolídeos e fragmentos de braquiópodes. A porosidade é classificada como intracristalina, intercristalina e vugular e ocupa menos de 1% em lâmina.

## 8.2 Ensaio de índices físicos

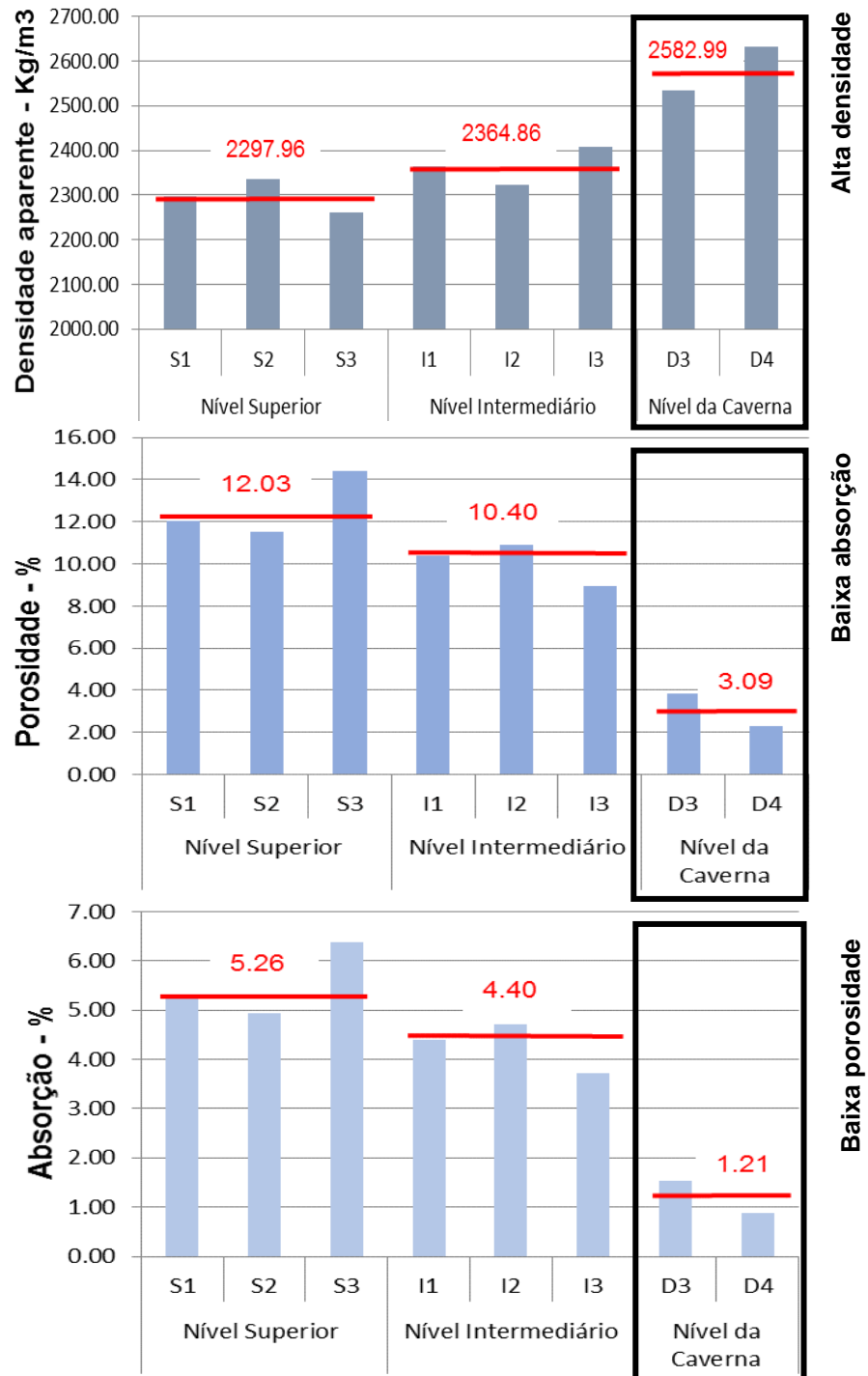
De acordo com os resultados dos ensaios dos índices físicos (Tabela 5 e Figura 42), as amostras correspondentes ao nível da caverna apresentam densidades acima de 2500 kg/m<sup>3</sup>. As densidades do nível superior variam de 2334,51 a 2260,31 kg/m<sup>3</sup> e do nível intermediário variam de 2323,45 a 2407,62 kg/m<sup>3</sup>.

As porosidades dos níveis superior e intermediários variam de 11,52 e 14,41% e 8,96 e 10,88%, respectivamente. As amostras do nível da caverna têm porosidades entre 2,30 e 3,87%. Já a absorção d'água do nível da caverna é inferior a 1,5%, dos níveis intermediários é cerca de 4,40% e do nível superior pode chegar a 6,38%.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de índices físicos.

Nível	Amostra	D. Apar. kg/m <sup>3</sup>	Porosidade %	Absorção %
Superior	S1	2297.96	12.03	5.26
	S2	2334.51	11.52	4.94
	S3	2260.31	14.41	6.38
Intermediário	I1	2364.86	10.40	4.40
	I2	2323.45	10.88	4.71
	I3	2407.62	8.96	3.72
Caverna	D3	2534.16	3.87	1.53
	D4	2631.82	2.30	0.88

Figura 42 - Gráficos de densidade aparente e porosidade e absorção d'água.



\*Valores em vermelho correspondem a média dos níveis estudados.

Fonte: do autor



Ao observar a média dos parâmetros dos índices físicos de cada nível estudado percebe-se que há um aumento da densidade e uma diminuição da porosidade e absorção d'água com a profundidade. Destacando-se, assim, o nível da caverna por apresentar valores de densidades mais altos e valores de porosidades e absorção d'água mais baixos.

### 8.3 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de resistência a compressão uniaxial objetiva simular tensões a que os estratos são submetidos em condições reais, tais como esforços tectônicos e peso do material sobrejacente.

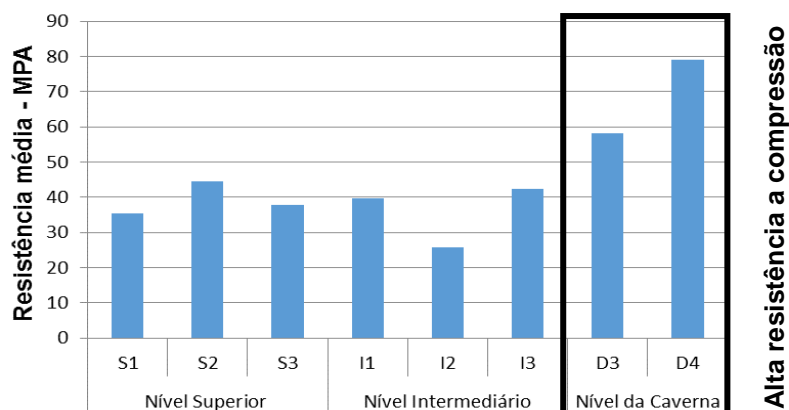
Conforme o ensaio (Tabela 6 e Figura 43), as amostras do nível superior apresentam resistências entre 35,5 e 44,5 Mpa. Os corpos de prova dos níveis intermediários variam de 25,7 a 39,8 Mpa e as amostras do nível da caverna apresentam valores entre 58,1 a 79, Mpa. O ordenamento de resistência das amostras segundo o ensaio apresentaram a seguinte configuração: D4 > D3 > S2 > I3 > I1 > S3 > S1 > I2. Portanto, as amostras do nível da caverna foram as mais resistentes ao ensaio de compressão uniaxial.

Acrescenta-se ainda que o material do nível da caverna fragmentou-se, após o rompimento, em sua maioria em pequenas lascas alongadas e compactas. Diferentemente das outras amostras que fragmentaram-se em pedaços grandes, irregulares e pulverulentos.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de compressão uniaxial.

Nível	Amostra	Resistência Média (Mpa)
Superior	S1	35.5
	S2	44.5
	S3	37.8
Intermediário	I1	39.8
	I2	25.7
	I3	42.3
Caverna	D3	58.1
	D4	79

Figura 43 - Gráfico do ensaio de compressão uniaxial.



Fonte: do autor

#### 8.4 Ensaio de desgaste por abrasão

Esta experiência tenta simular o desgaste por abrasão mecânica que acontece naturalmente no processo de carstificação.

A abrasão mecânica natural em rochas carbonáticas pode ocorrer principalmente em fraturas e condutos pelo efeito da circulação das águas carregadas de partículas (sejam de origem pluvial ou flúvio-subterrâneo), da movimentação de sedimentos (de origem autóctone e alóctone) e até mesmo de crescimentos de plantas e raízes. É comum observar no interior das cavidades naturais do Lajedo Rosário a presença sedimentos e blocos de diversos tamanhos ao longo de condutos e galerias, sinais de circulação de águas subterrâneas, bem como árvores de grande porte. Embora pouco expressiva, a abrasão mecânica nas rochas, somadas a outros agentes carstificadores, ajuda no desenvolvimento de vazios e na formação de cavernas.

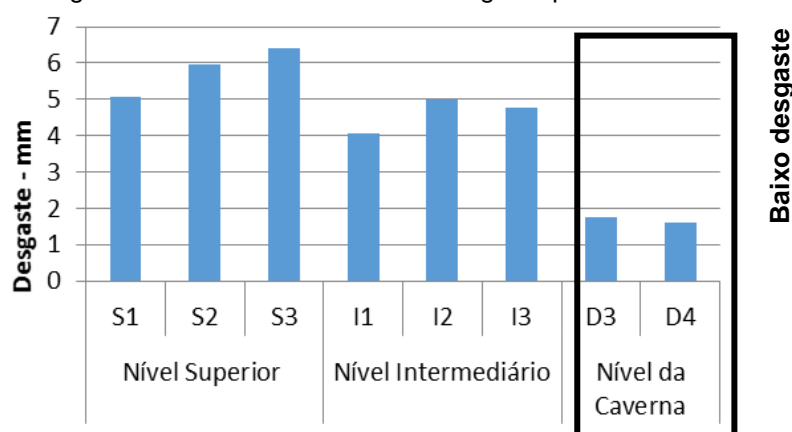
Vale ressaltar que o desgaste dos materiais estudados neste ensaio foi excessivo, ultrapassando o limite relógio medidor com o ensaio completo (1000m), por isso adotou-se somente 500m de desgaste.

Segundo o ensaio (Tabela 7 e Figura 44), o desgaste do nível superior varia de 5,08 a 6,42 mm, dos níveis intermediários variam de 4,07 e 5,01 mm e do nível da caverna de 1,59 e 1,76 mm. O ordenamento de resistência das amostras apresentam a seguinte configuração:  $D4 > D3 > I1 > I3 > I2 > S1 > S2 > S3$ . O material do nível da caverna mostrou-se muito resistente à abrasão mecânica, em relação aos outros níveis.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de desgaste por abrasão.

Nível	Amostra	Desgaste 500m
Superior	S1	5.08
	S2	5.95
	S3	6.42
Intermediário	I1	4.07
	I2	5.01
	I3	4.77
Caverna	D3	1.76
	D4	1.59

Figura 44 - Gráfico do ensaio de desgaste por abrasão.



Fonte: do autor

## 8.5 Ensaio de ataque químico

Este ensaio químico teve como objetivo simular, de forma acelerada, o processo natural de carstificação em zona freática, no intuito de verificar como se comporta cada uma das amostras pesquisadas.

A dissolução é o agente carstificador de fundamental importância na formação de cavernas. As rochas carbonáticas, por serem solúveis, acabam por sofrer com a dissolução ocasionada por ácidos fracos, formados normalmente no meio-ambiente. O ataque químico provocado na dissolução tem como consequência a alteração e desagregação da rocha, formação e expansão de vazios e alargamento de fraturas e condutos. É comum encontrar, no lajedo do Rosário, como efeito da dissolução, superfícies irregulares e lapiezadas, fraturas alargadas que dão acesso a cavernas e salões amplos gerados por antigas zonas freáticas.

Um dos ingredientes básicos para se ter o processo de carstificação é o ataque químico das rochas carbonáticas por ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ). Sabe-se que o ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ) é um ácido muito fraco e o ataque químico causado por ele é muito lento, portanto para execução deste ensaio, escolheu-se o ácido clorídrico (HCl) por ser um ácido forte, a fim de se obter resultados mais rápidos.

Os valores de cada corpo de prova estão expressos em porcentagem e representam a perda de massa em relação ao peso inicial (Tabela 8 e Figura 45).

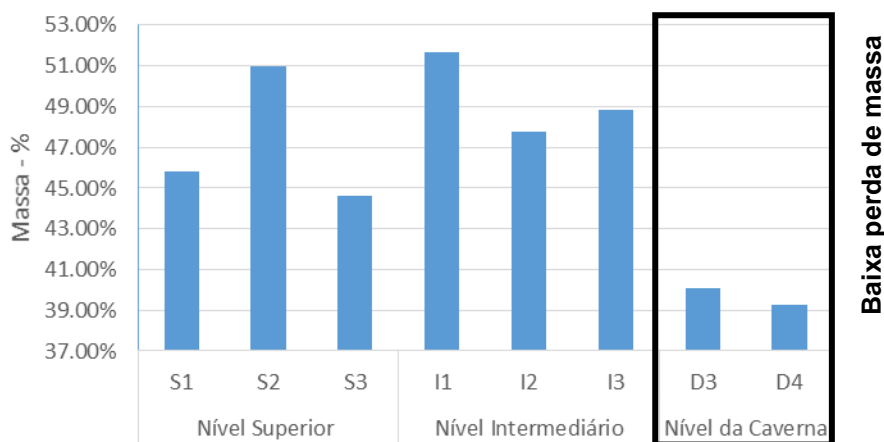
O nível superior teve perda de massa variando entre 44.63% e 50.98%. As amostras I1, I2 e I3 tiveram perdas de massa de 51.64%, 47.79% e 48.82%, respectivamente. E as amostras do nível da caverna foram as mais resistentes ao ensaio de ataque químico (perda de massa em torno de 40%).

Em lupa todas as amostras classificadas como micropesparito (S1, S2, S3, I1, I2 e I3) antes do ataque mostraram superfícies rugosas e visualização de alguns fósseis. Em MEV a maior parte destas amostras é composta por cristais micríticos anédricos e em meio a estes encontram-se cristais esparíticos subdiomórficos com arestas angulosas. As algas são facilmente detectadas e os fósseis com carapaças não são muito evidentes, entretanto alguns possuem cavidades no lugar das carapaças. As amostras de carbonato cristalino, antes do ataque químico, mostraram-se bastante maciças, rugosas e com aspecto vítreo em observação em lupa. Em MEV, os cristais micríticos anédricos e os esparíticos subdiomórficos estão basicamente em mesma proporção e também é possível encontrar alguns vestígios de algas.

Tabela 8 - Perda de massa após 2 horas de ensaio de ataque químico.

Nível	AMOSTRAS	Perda de Massa
Superior	S1	45.82%
	S2	50.98%
	S3	44.63%
Intermediário	I1	51.64%
	I2	47.79%
	I3	48.82%
Caverna	D3	40.10%
	D4	39.24%

Figura 45 - Histograma de perda de massa após ensaio de ataque químico.

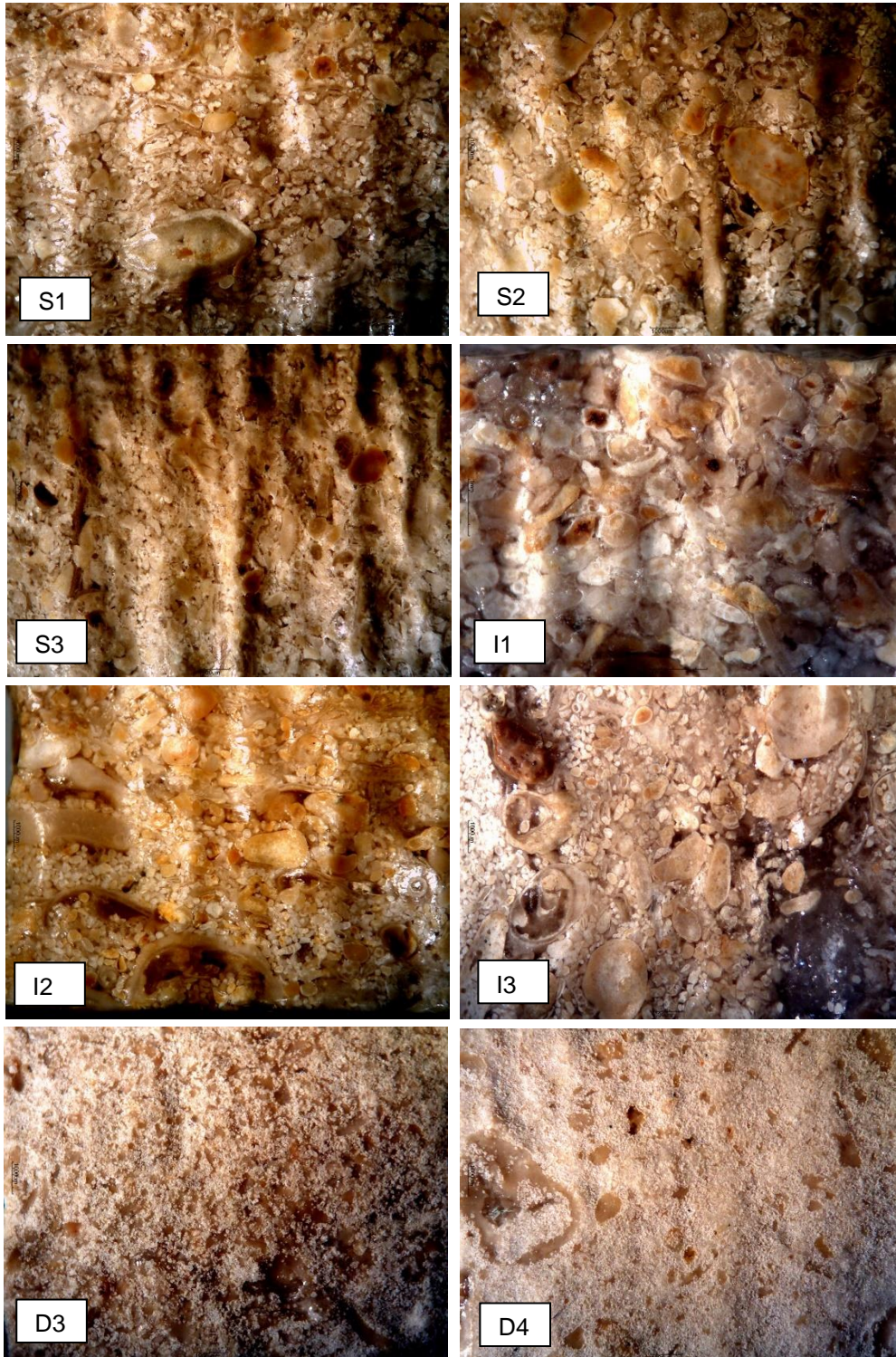


Fonte: do autor

Após o ataque em lupa, os micropelospiritos apresentaram um aspecto polido com evidenciação do empacotamento dos componentes aloquímicos e cavidades formadas nas carapaças de alguns fósseis. O movimento de subida das bolhas formadas pela reação química deixou as bases e laterais das amostras com topografia ondulada (Figura 46). Já em MEV, o relevo das amostras tornaram-se mais uniformes, onde os cristais micríticos adquiriram formas alongadas ou arredondadas e os esparíticos perderam suas arestas e exibindo aspecto polido. Nos locais dos aloquímicos o desgaste foi mais proeminente ou formaram-se cavidades, isto ocorreu devido os aloquímicos apresentarem uma fração mais fina dos cristais micríticos, onde o ataque químico foi mais efetivo (Figura 47).

No carbonato cristalino (amostras D3 e D4), após o ataque, as amostras em lupa ficaram com superfícies muito ásperas, com cristais bastantes destacados e evidenciação de alguns aloquímicos sem qualquer estrutura interna visível (Figura 46). Em MEV, a topografia ficou bastante irregular, assemelhando-se aos campos de lapiás alveolares observados no próprio Lajedo do Rosário, onde os cristais micríticos foram totalmente corroídos (pelo menos na superfície das amostras), restando apenas cristais esparíticos de dolomita (por serem mais resistentes), entretanto, com porosidade acentuada e desgaste maior nos planos de clivagem. Aloquímicos reliquias tornaram-se evidentes pelo maior desgaste (Figura 47).

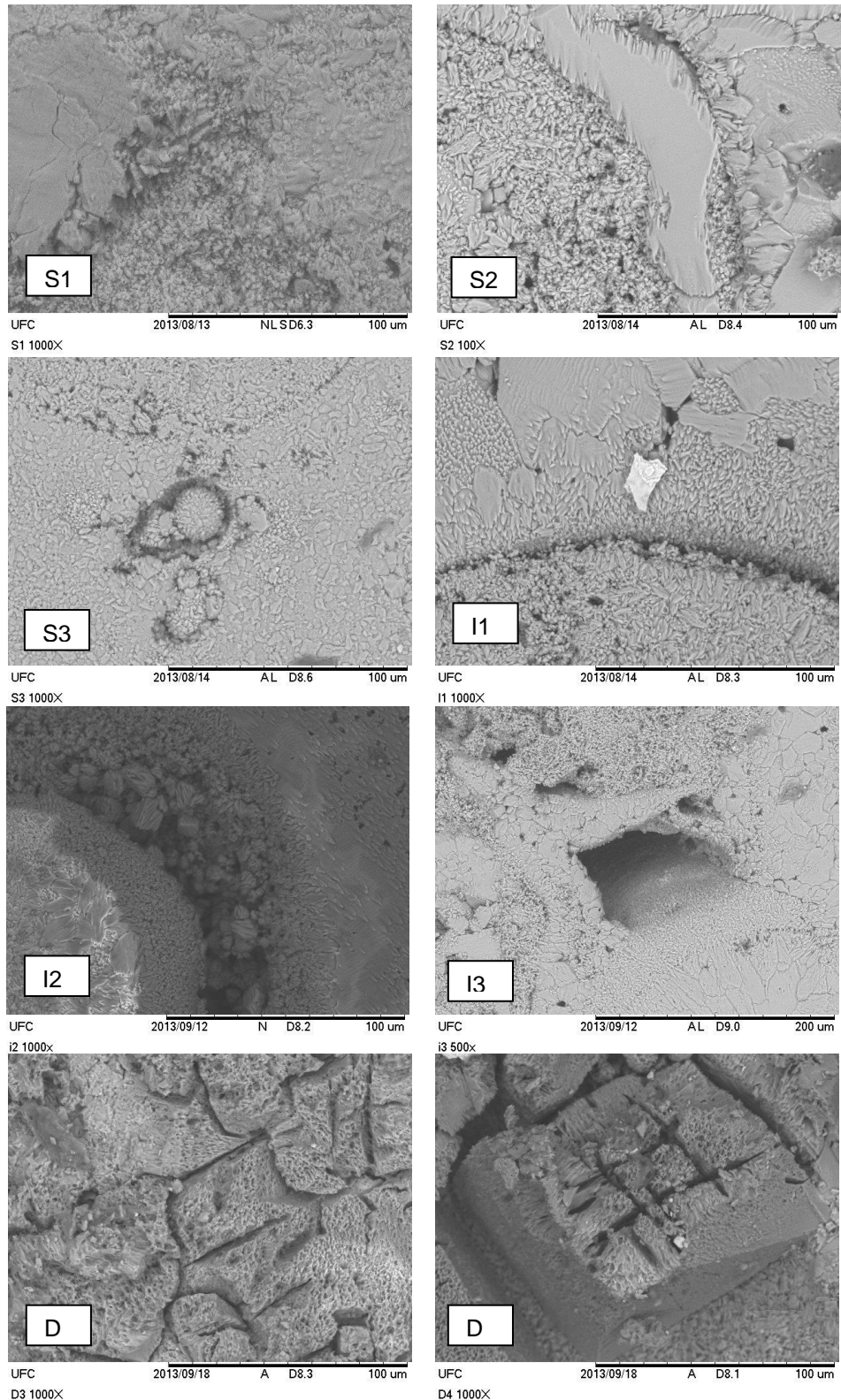
Figura 46 - Amostras em lupa após ataque químico.



Os micropelotasparitos (S1, S2, S3, I1, I2 e I3) apresentaram um aspecto polido com evidência do empacotamento dos componentes aloquímicos. Os carbonatos cristalinos (D3 e D4) apresentaram superfícies muito ásperas, com cristais bastante destacados e evidência de alguns aloquímicos sem qualquer estrutura interna visível.

Fonte: do autor

Figura 47 - Amostras em MEV após ataque químico.



Nos micropelagitos (S1, S2, S3, I1, I2 e I3), os cristais micríticos adquiriram formas alongadas ou arredondadas e os esparíticos perderam suas arestas e exibindo aspecto polido. Nos locais dos aloquímicos o desgaste foi mais proeminente ou formaram-se cavidades. Nos carbonatos cristalinos (D3 e D4) as amostras adquiriram topografia irregular, assemelhando-se aos campos de lapiás alveolares, onde os cristais micríticos foram totalmente corroídos, restando apenas cristais esparíticos de dolomita. Fonte: do autor

## 8.6 Análises químicas

Os resultados das análises químicas contemplam os elementos maiores, menores e traços, dentre estes, os mais expressivos são CaO, MgO e SiO<sub>2</sub>. Os outros elementos não exibem valores significativos (Tabela 9).

Em todas amostras, por se tratarem de rochas carbonáticas, observa-se abundância nos teores de CaO. Nos níveis superior e intermediários as porcentagens de CaO são parecidas, variando entre 54,36 e 55,14%. No nível da caverna a presença de CaO é inferior a 50%, variando entre 45,83 e 48,61.

Em relação aos teores de MgO, as amostras dos níveis superior e intermediários apresentam valores reduzidos, oscilando entre 0,34 a 0,53%. As amostras do nível da caverna apresentam teores maiores de MgO, que variam de 5,66 a 8,02%. A presença de MgO pode estar relacionada a presença calcita magnésiana e de dolomita.

De acordo com a classificação das rochas calcárias de Pettijohn (1949), que leva em consideração o teor de MgO (Tabela 10), as amostras dos níveis superior e intermediários são classificadas como calcários calcíticos e as do nível da caverna são classificadas como calcários dolomíticos.

Já quanto aos teores de SiO<sub>2</sub>, todas as amostras exibem baixa concentração, em torno de 0,5%. Este fato sugere uma pequena contribuição de sedimentos terrígenos durante a deposição dos níveis carbonáticos estudados.



Tabela 9 - Análise química das amostras

Elem.	Unid.	SUPERIOR			INTERMEDIÁRIO			CAVERNA	
		S 1	S 2	S 3	I 1	I 2	I 3	D 3	D 4
<b>MAIORES</b>									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.15	0.12	0.10	0.17	0.15	0.15	0.18	0.22
Ba	PPM	5	6	5	5	4	5	5	3
Be	PPM	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
CaO	%	55.03	54.55	55.11	54.36	55.14	54.77	48.61	45.83
Ce	PPM	2.3	2.8	1.8	3.4	2.2	2.4	3.3	2.9
Co	PPM	0.8	0.5	0.4	1.0	0.8	0.7	0.6	1.0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Cs	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.1	0.1
Dy	PPM	0.20	0.05	0.13	0.30	0.25	0.18	0.27	0.33
Eu	PPM	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06
Er	PPM	0.08	0.09	0.06	0.13	0.06	0.06	0.04	0.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.08	0.10	0.11	0.27	0.12	0.14	0.17	0.14
Ga	PPM	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Gd	PPM	0.25	0.33	0.14	0.34	0.21	0.12	0.29	0.28
Hf	PPM	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1	0.2	<0.1	0.2
Ho	PPM	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.03	0.02	<0.02	0.02
K <sub>2</sub> O	%	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
La	PPM	1.4	1.5	1.1	2.3	1.5	1.5	1.8	1.5
LOI	%	43.7	44.3	43.7	44.1	43.6	43.9	44.8	45.1
Lu	PPM	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.02
MgO	%	0.49	0.51	0.53	0.47	0.34	0.48	5.66	8.02
MnO	%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Na <sub>2</sub> O	%	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.02
Nb	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Nd	PPM	1.5	<0.3	1.2	0.7	1.7	1.1	1.9	0.9
Ni	PPM	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.03	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.01	0.01	<0.01
Pr	PPM	0.22	0.21	0.20	0.28	0.26	0.27	0.35	0.27
Rb	PPM	1.9	1.6	1.5	2.2	2.0	2.4	2.1	2.4
Sc	PPM	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
SiO <sub>2</sub>	%	0.42	0.33	0.31	0.51	0.53	0.46	0.47	0.54
Sm	PPM	0.18	0.17	0.12	0.28	0.21	0.19	0.33	0.25
Sn	PPM	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Sr	PPM	178.7	191.1	211.7	156.8	117.5	175.5	138.3	121.0
Total	%	99.96	99.96	99.96	99.97	99.97	99.96	99.96	99.97

Elem.	Unid.	SUPERIOR			INTERMEDIÁRIO			CAVERNA	
		S 1	S 2	S 3	I 1	I 2	I 3	D 3	D 4
<b>MENORES</b>									
Ta	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tb	PPM	<0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Th	PPM	<0.2	<0.2	<0.2	0.3	0.2	0.2	<0.2	0.3
TiO <sub>2</sub>	%	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Tm	PPM	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
U	PPM	0.8	0.9	0.8	0.7	0.5	0.7	0.8	0.6
V	PPM	10	9	<8	13	<8	<8	<8	10
W	PPM	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	2.1	<0.5
Y	PPM	0.5	0.5	0.8	0.9	0.8	0.9	1.1	1.1
Yb	PPM	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	<0.05	0.07	0.08	<0.05
Zr	PPM	3.1	2.8	2.4	4.6	3.4	4.1	3.6	3.8
TOT/C	%	12.33	12.34	12.62	12.11	12.27	12.48	12.50	12.82
TOT/S	%	0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.04	0.02	0.03
<b>TRAÇOS</b>									
Ag	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
As	PPM	0.8	0.8	0.5	4.0	1.3	0.9	1.1	0.9
Au	PPB	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	0.8	<0.5	<0.5	<0.5
Bi	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cd	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cu	PPM	1.0	0.9	0.8	1.6	1.3	0.9	2.3	1.2
Hg	PPM	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
Mo	PPM	0.3	0.3	0.2	0.7	0.1	0.3	0.4	0.1
Ni	PPM	1.9	2.4	1.8	2.3	1.9	1.7	2.8	2.3
Pb	PPM	0.6	0.6	0.5	0.9	0.9	0.8	1.5	0.6
Sb	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Se	PPM	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tl	PPM	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Zn	PPM	2	2	1	2	2	2	3	1

Tabela 10 - Classificação das rochas carbonáticas em função dos teores MgO.

<b>Classificação</b>	<b>% de MgO</b>
Calcário calcítico	0 a 1,1
Calcário magnésiano	1,1 a 2,1
Calcário dolomítico	2,1 a 10,8
Dolomito calcítico	10,8 a 19,5
Dolomito	19,5 a 21,7

Fonte: Pettijohn (1949)

## 8.7 Difratométricas de raios-x

Os resultados da difratometria de raios-x para determinação mineralógica estão expressos em porcentagem e são baseados em análise semiquantitativa.

Os materiais extraídos dos níveis de superfície e intermediários, exibem conteúdo mineralógico similares. Essas amostras apresentam abundância em calcita,

minerais traços de calcita magnesiana e quartzo. Presença de sílica também foi constatada, possivelmente trata-se de material amorfo.

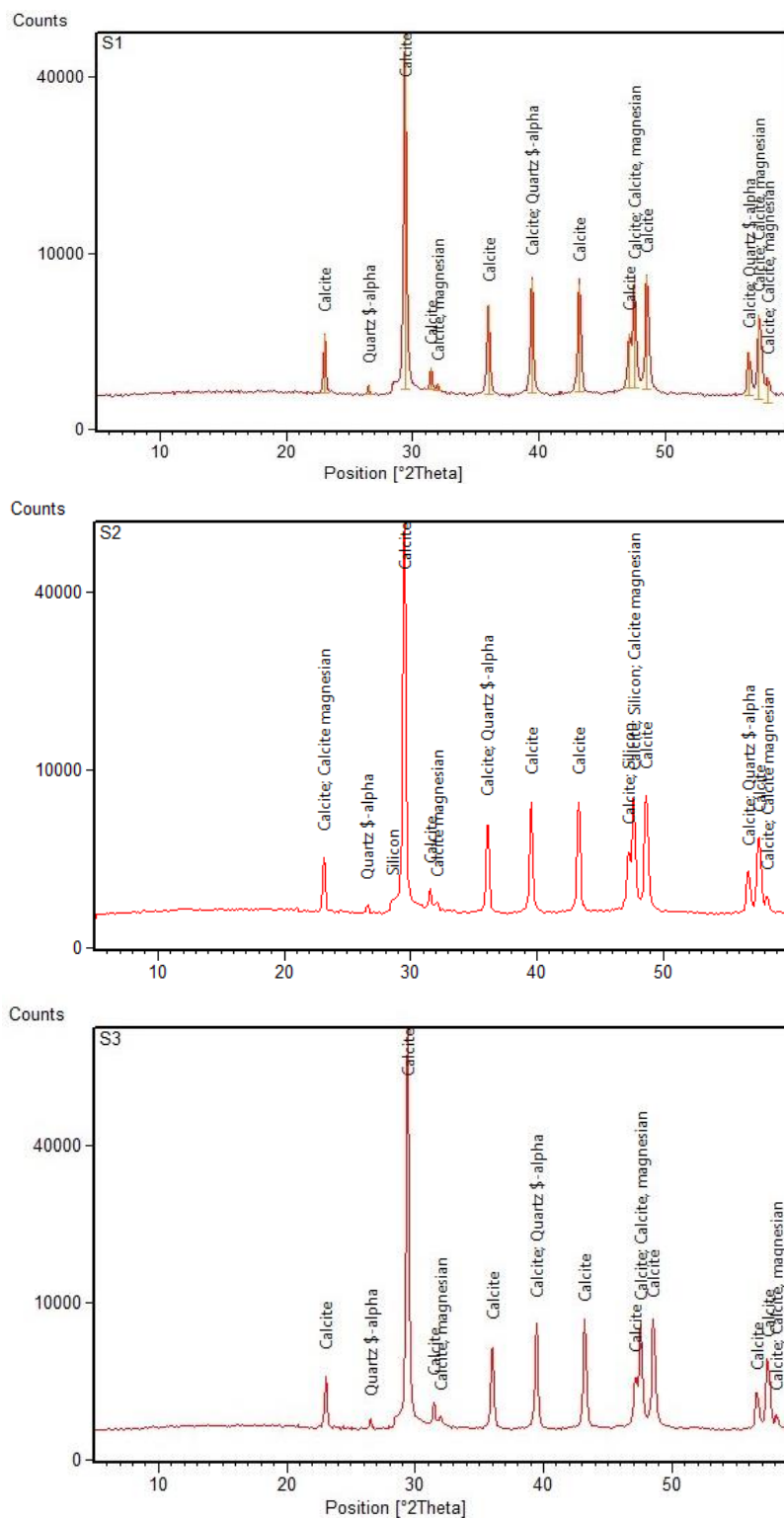
Em nível de superfície a amostra S1 é composta aproximadamente por 98% de calcita e 2% de calcita magnesiana (IMC) e 1% de quartzo, a amostra S2 compreende 96% de calcita, 3% de calcita magnesiana (HMC) e cerca de 1% de quartzo e sílica amorfa. A amostra S3 apresenta 97% de calcita e 3% de calcita magnesiana (IMC), quartzo e sílica amorfa (Figura 48).

Os materiais dos níveis intermediários tiveram os seguintes resultados: a amostra I1 apresenta 97% de calcita e somam 3% de calcita magnesiana, quartzo e material amorfo, a amostra I2 contém 95% de calcita, 3% de material silicoso amorfo e soma 2% de calcita magnesiana (IMC) e quartzo. Já a amostra I3 apresenta os mesmos minerais dos estratos superiores, porém com variações mais significativas nas porcentagens, 76% de calcita, 21% de calcita magnesiana (IMC), 2% material amorfo e 1% de quartzo (Figura 49).

Diferentemente dos outros níveis analisados, os materiais que representam o nível da caverna são constituídos basicamente de dolomita e calcita, com o predomínio do primeiro. As amostra D3 e D4 tiveram os mesmos resultados, apresentando 62% de dolomita e 38% de calcita (Figura 50).

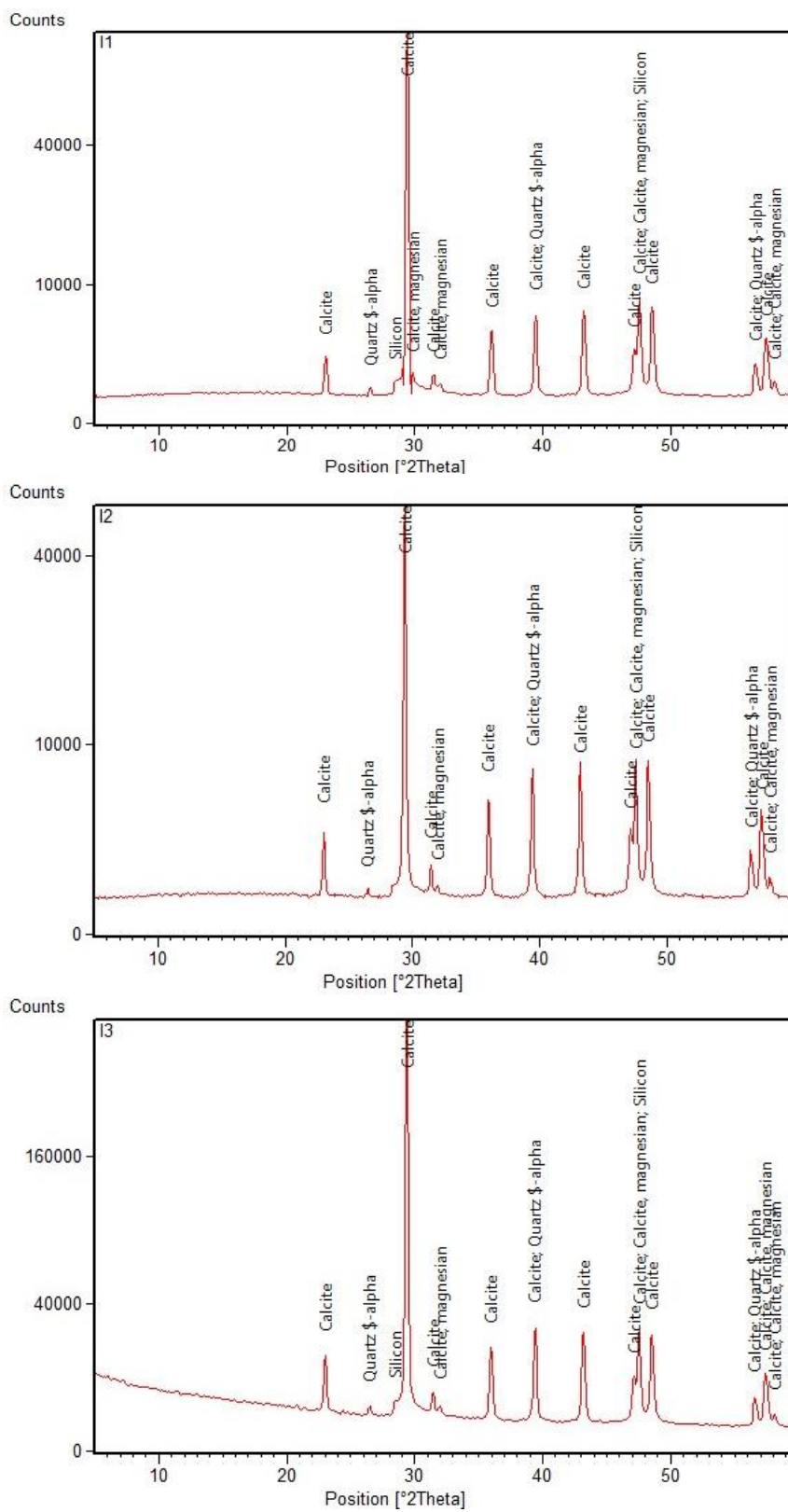
Levando em consideração a comparação das análises químicas e a difratometrias de raios-x, pode-se atribuir os teores de MgO das amostras dos níveis superior e intermediários a presença da calcita magnesiana e no nível da caverna a presença de dolomita. Os teores de CaO nas amostras estão associados principalmente a presença da calcita, mas também aos minerais de calcita magnesiana e dolomita. E por fim, os teores de SiO<sub>2</sub> se devem principalmente a presença de minerais de quartzo.

Figura 48 - Difratoformas de raios-x das amostras do nível superior.



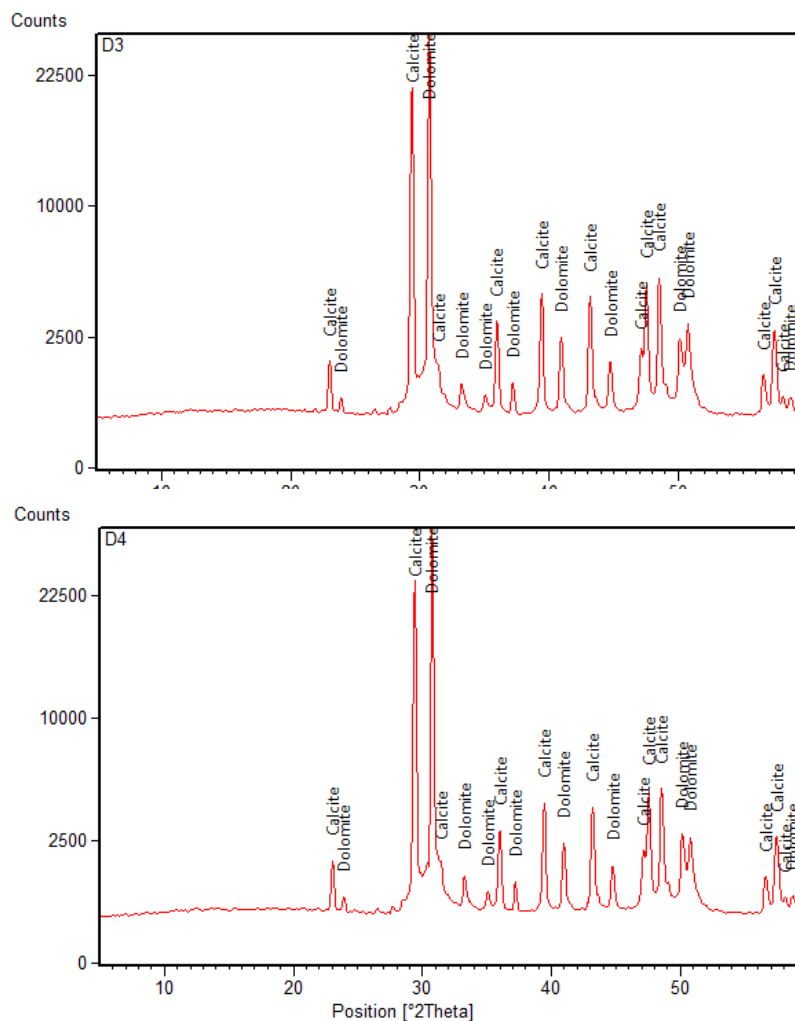
Fonte: do autor

Figura 49 - Difratogramas de raios-x das amostra dos níveis intermediários.



Fonte: do autor

Figura 50 - Difratoformas de raios-x das amostras do nível da caverna.



Fonte: do autor

## 8.8 Discussão acerca dos resultados dos ensaios

De acordo com as observações realizadas, as amostras dos níveis superior e intermediários possuem as mesmas classificações. Do ponto de vista químico, são definidos como calcários calcínicos e, do ponto de vista petrográfico, são definidos como biopelosparito/grainstone, com variações nos componentes aloquímicos, tamanhos dos grãos e na porosidade. Em pesquisa anterior realizada por Silva (2010), também, constatou-se que todos os estratos acima do nível da caverna Desafio são constituídos de biopelosparito/grainstone. Já o nível da caverna, apresenta classificação distinta, é identificado quimicamente como calcário dolomítico e petrograficamente como carbonato cristalino.

Conforme verificado nos ensaios, o nível da caverna destaca-se em diversos aspectos em relação aos outros níveis estudados. Essa diferença está atribuída a dois fatores importantes, ao tipo de sedimentação e a mineralogia.

Analisando os resultados da petrografia e dos ensaios de índices físicos constata-se que as amostras dos níveis superior e intermediários foram originadas a partir de sedimentação química e detrítico-biogênica pouco compactada, por isso adquiriu-se caráter de pouca densidade, alta porosidade e absorção d'água. O nível da caverna provém de sedimentação exclusivamente química (lama carbonática), o que torna a rocha mais densa e com menor porosidade e absorção d'água.

Segundo a ABNT (2010) os parâmetros dos índices físicos fornecem interpretações teóricas importantes, que elucidam os resultados dos outros ensaios realizados neste trabalho, tais como:

- Alta densidade = alta resistência mecânica da rocha;
- Alta porosidade = baixa resistência mecânica da rocha;
- Alta absorção = baixa durabilidade e redução da resistência mecânica com o tempo;
- Aumento da saturação = menor resistência mecânica.

Na difratometria de raios-x verificou-se nas amostras a presença dos seguintes minerais carbonáticos: calcita, dolomita e traços de calcita magnesiana (tipo IMC e HMC).

Railsback (2006) explica que há uma solubilidade diferenciada entre os minerais carbonáticos comuns. Em geral o low-magnesium calcite-LMC (calcita magnesiana com baixo teor de magnésio) é menos solúvel que a calcita pura, o intermediate magnesium calcite-IMC (calcita magnesiana com médio teor de magnésio) apresenta solubilidade entre a calcita pura e aragonita, a high-magnesium calcite-HMC (calcita magnesiana com alto teor de magnésio) tem solubilidade superior a aragonita, e a dolomita comum é menos solúvel que todos estes. Portanto, resumidamente, tem-se o seguinte diagrama de solubilidade de minerais carbonáticos:

MENOS SOLUVEL (ESTÁVEL)    →    MAIS SOLUVEL (INSTÁVEL)  
**DOLOMITA → LMC → CALCITA → IMC → ARAGONITA → HMC**

A quantidade de minerais carbonáticos presentes nos fácies determinam sua maior ou menor resistência à dissolução. Baseado nessas informações e nos resultados dos ensaios, chegou-se às seguintes interpretações de como supostamente ocorre o processo de carstificação nos níveis estudados:

De acordo com o ensaio de ataque químico, constatou-se que os níveis superiores e intermediários estão mais sujeitos à dissolução, isto se deve à predominância de calcita nesses fácies. Esse fato somado à alta porosidade e absorção d'água fazem com que, em condições naturais de submersão, a ação do ataque químico ocorra não somente externamente aos materiais, mas também internamente. Com o passar do tempo ocorre um efetivo alargamento/desgaste de fraturas e condutos, já existentes, bem como, por atuação interna, ocorre a geração de novos vazios, a alteração e a fragilização de todo o pacote rochoso. O nível da caverna, por conter grande quantidade de dolomita, apresenta maior resistência ao ataque químico. Essa característica, juntamente com a menor porosidade e absorção d'água, faz com que a ação do ataque químico ocorra mais efetivamente nas superfícies expostas do material. Portanto, com o passar do tempo ocorre um lento alargamento/desgaste de fraturas e condutos e internamente, pela baixa penetrabilidade d'água, o material permanece pouco alterado ou inalterado.

De acordo com o resultados do ensaio de compressão uniaxial, o pacote rochoso estudado apresenta resistências distintas nos estratos. Os níveis superior e intermediários se mostraram menos resistentes, com valores entre 25 e 45 Mpa e o nível da caverna sobressaiu-se por mostrar-se muito resistente, atingindo valores de até 79 Mpa. Essa característica pode gerar propagação de fraturamento diferenciada, podendo até, dependendo da intensidade da tensão tectônica aplicada, não ocorrer no nível da caverna o rompimento. Em se tratando do peso sobrejacente do material, os estratos dos níveis superiores e intermediários, que são mais alteráveis e menos resistentes a compressão tendem, com o tempo, a se tornarem ainda mais frágeis e, assim, mais sujeitos ao rompimento e a fragmentação. Enquanto o nível da caverna, que é mais resistente ao ataque químico e a compressão, tende a manter-se inalterado ou pouco alterado.

É comum observar no Lajedo do Rosário superfícies abatidas por desmoronamentos e tombamento de blocos. Possivelmente estas feições não foram formadas apenas pelo efeito da dissolução, mas também por diferenças na resistência das camadas.

No início das pesquisas deste trabalho pensou-se que o nível da caverna seria o estrato mais frágil de todos e mais susceptível a formação de vazios, por isso apresentaria maior potencial de formação de cavidade naturais. Entretanto, de acordo com os resultados dos ensaios, contradizendo a hipótese inicial, o nível da caverna se mostra mais resistente em diversos aspectos. Então, como poderia ocorrer a formação de cavernas num estrato tão resistente? Esse questionamento foi elucidado com a continuação da pesquisa, exposta a seguir.

Em campo, observa-se que o extrato do nível da caverna apresenta porções de concentrações de cavidades centimétricas que estão preenchidas ou não por núcleos calcíticos (não mensurada na petrografia e no ensaio de índices físicos). Este aspecto já foi descrito na caverna Desafio por Silva (2011), bem como em outras cavernas no calcário Jandaíra por Santos & Cunha (2011), Ramos Neto (2012), Santos (2010), Gomes (2008) e Nascimento (2010) em fácies classificados como mudstone e carbonato cristalino, denominados por eles como níveis cavernosos. A ocorrência dessas cavidades (com ou sem núcleos calcíticos) não é exclusiva dos estratos compostos por mudstones e carbonatos cristalinos, podem ocorrer também em outros estratos, entretanto são menos frequentes.

O nível da caverna, em lâmina, apresenta porções de matriz micrítica, cristais de dolomita com inclusões de micrita e, as vezes, aspecto indefinido entre porções micríticas e esparíticas. Estas observações tornam claro que este fácies evoluiu (não completamente) de um mudstone para um carbonato cristalino por processo de dolomitização. O aspecto cavernoso do fácies está fortemente relacionado com o processo de dolomitização.

Segundo Melo (2010), o mineral dolomita, na formação Jandaíra, está intrinsecamente relacionado à presença de lama carbonática, sendo desta forma, mais freqüente e mais abundante em rochas suportadas pela mesma, ou seja, mudstones e wackestones. Quando ocorre em rochas suportadas por grãos (packstones), restringe-se ainda às porções com lama carbonática. O fato de estar exclusivamente subordinada à lama carbonática ou substituindo cristais do cimento, sugere que a dolomita, na Formação Jandaíra, origina-se, essencialmente, da substituição da calcita presente na matriz e/ou no cimento das rochas, sendo, portanto, um mineral secundário gerado pelo processo de dolomitização, e não por precipitação primária.

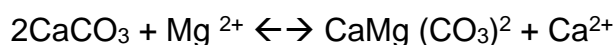
Maliva, et. al. (2011) ressaltam que alterações na abundância na porosidade e texturas associadas à dolomitização foram tratadas em algumas



investigações, tais como, os estudos de Landes (1946), Weyl (1960) e Murray (1960). Uma observação chave desses estudos é que a dolomitização pode resultar no aumento ou na diminuição da porosidade, dependendo da quantidade de carbonato externo que é adicionado ao sistema diagenético. Quando o sistema está, em grande parte, fechado no que diz respeito à fonte de carbonato, a porosidade teoricamente aumenta devido ao menor volume molar da dolomita em comparação à calcita. A transformação de uma rocha calcária em dolomita deve ser acompanhada por uma redução de 12,1% em volume, o que pode manifestar-se por um aumento da porosidade (VAN TUYL, 1914). Se uma fonte externa de carbonato é adicionada, então tem-se menor ganho de porosidade, e se o carbonato importado é uma quantidade significativa, não haverá redução de porosidade. Se houver exportação de líquido carbonático, então, a porosidade é aumentada.

Sun (1995) explica que é comum a associação entre dolomitização e porosidade e propõe três modelos para criação da porosidade:

1. O processo de criação e espaço poroso decorre da substituição (WEYL, 1960) da aragonita e/ou calcita, representando pela equação:



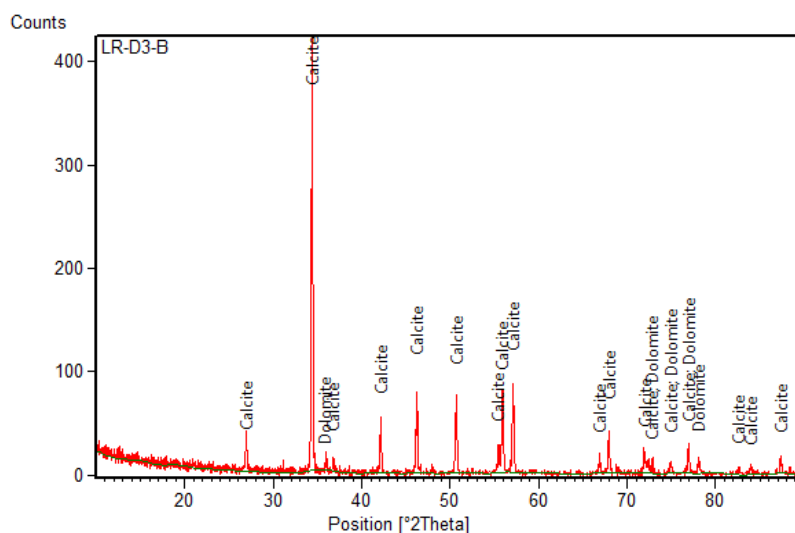
Como a dolomita apresenta maior densidade, a conversão da calcita/aragonita em dolomita representaria um crescimento de 12-13% em porosidade.

2. Dissolução de calcita residual, fator importante na criação de porosidade em rocha parcialmente dolomitizada, com 50% ou mais de dolomita, embora esse processo não seja totalmente entendido.
3. O terceiro caso, que representa o pensamento mais aceito em relação à porosidade e dolomitização, considera que este processo ocorre concomitantemente à dissolução de calcita/aragonita (que serviriam como fontes de carbonatos para os processos de dolomitização), sendo o balanço entre a dissolução e o crescimento de cristais de dolomita, o fator responsável pela criação de porosidade na rocha. Assim, quanto maior a taxa de dissolução em relação ao crescimento de cristais de dolomita, maior a porosidade observada.

Observou-se que as amostras D3 e D4 do nível da caverna, que em geral apresenta aspecto maciço, contém algumas raras porções de aspecto esponjoso (com

maior porosidade) que geralmente estão próximas as porções cavernosas. A análise de difratometria de raios-x revela que as porções esponjosas são compostas basicamente por calcita (94%) com traços de dolomita (6%), contrastando com a análise representativa do fácies. Também é observável em lâmina porções com ausência de dolomita (Figura 51). A calcita por ser mineral mais instável, torna as porções com baixa porcentagem ou ausência de dolomita mais suscetíveis à dissolução.

Figura 51 - Porção esponjosa do nível da caverna.



Difratograma de raios-X da porção esponjosa: Calcita (94%), e dolomita (6%).



Indicação da porção esponjosa em amostra de mão e Lâmina delgada com porção ausente de cristais de dolomita.

Fonte: do autor

Essas observações ajudam a compreender como ocorreu a evolução da formação do aspecto cavernoso do fácies, que corrobora com o modelo 3 de Sun (1995). Primeiramente ocorreu a dolomitização, na qual criou-se vazios (por diminuição de volume) e/ou porções concentradas de calcita, que por sua vez foram dissolvidas (completamente ou parcialmente), criando-se também vazios. Esses vazios, em fase posterior, foram preenchidos por solução rica em carbonatos, no qual propiciou a formações dos núcleos calcíticos (geodos).

Portanto, para ocorrer a formação de cavidades naturais no Lajedo do Rosário no nível da caverna são necessários dois ingredientes essenciais: a resistência do estrato e porções cavernosas.

A atuação dos agentes carstificadores, tais como compressão (tectônica e peso das camadas), desgaste por abrasão e dissolução, é menos efetiva nas camadas mais resistentes. E suas concentrações de vazios (porções cavernosas), no processo dissolutivo da carstificação em nível freático, tendem a crescer e a se unir, formando vazios maiores, que poderão tornar-se futuramente cavernas. Com o passar do tempo, as camadas mais resistentes tendem a conservar seus condutos e cavernas, não ocorrendo desmoronamento, mesmo com as pressões atuantes.

De forma geral, os estratos menos resistentes tendem, com o passar do tempo, a se tornar mais frágeis e mais sujeitos à fragmentação e ao desmoronamento. Assim, estes estratos dificilmente formarão cavernas.

Entretanto, os níveis menos resistentes imediatamente inferiores aos níveis mais resistentes também poderão formar cavernas, pois os níveis mais resistentes funcionarão como teto de sustentação evitando desmoronamento e obstrução de possíveis vazios que venham a surgir.

## 9 CONCLUSÕES

A pesquisa aponta que a área de estudo está inserida numa região com paisagem fortemente carstificada, desenvolvida sobre os calcários cretáceos da Formação Jandaíra. Nesta são encontradas feições típicas de dissolução, tais como lapiás, dolinas, *canyons* e, principalmente, cavernas. Neste contexto, destaca-se o Lajedo do Rosário, foco desse estudo, que abriga a maior concentração de cavidades naturais do estado do Rio Grande do Norte em um único afloramento, 97 unidades.

A análise estrutural de cunho regional permitiu verificar que a área de pesquisa se mostra intensamente marcada por feições rúpteis. Dentre estas, encontram-se megaestruturas, representadas por grandes falhamentos, e também estruturas mais rasas, de menores dimensões.

A estruturas desempenharam um grande papel no modelamento geomorfológico da região, podendo ser destacadas algumas feições, tais como: recuo da escarpa da borda sul da bacia condicionado pela Falha Afonso Bezerra e suas subsidiárias (SFA); formação das cachoeiras da Caripina e do Roncador, ocasionada pela movimentação da falha transtracional sinistral NE-SW; desenvolvimento do *canyon* do Rio Apodi-Mossoró controlado por descontinuidades NE-SW e E-W; e evidenciação de tufas calcárias por falhas normais de direção NE-SW e N-S.

Em análise estatística regional, registrou-se maior representatividade para as famílias de lineamentos orientadas para NW-SE (59%) e NE-SW (33%). Diversos pesquisadores atribuem lineamentos e falhas de direção NW-SE e NE-SW, na Bacia Potiguar, como resultado da reativação neotectônica dos Sistemas de Falhas Afonso Bezerra (trend NW-SE) e Carnaubais (trend NE-SW), respectivamente. (CALDAS *et al.* 1997a; CALDAS, 1997b; BEZERRA, 1998; Lima *et al.*, 1990; Maia, 2012).

Já no Lajedo do Rosário, que apresenta área relativamente pequena, ocorre uma forte densidade de lineamentos, quase 3.000 estruturas. A análise estatística revelou que há predomínio de famílias de fraturas orientadas NW-SE (50%), NE-SW (24%) e N-S (20%). Os intervalos de maiores significâncias dessas famílias, tomando como referência a Falha Transtracional Sinistral NE-SW, que secciona o lajedado, corrobora com o sistema cisalhante de Riedel com cinemática sinistral.

A análise do conjunto de cavernas presentes do Lajedo do Rosário indica que seus desenvolvimentos não se limitam a padrões preferenciais de orientação de

estruturas. A importância maior, neste caso, vem do cruzamento das estruturas, principalmente, as com orientação para NW-SE, NE-SW e E-W.

Ressalta-se que a maioria das cavidades naturais possuem condutos mais persistentes orientados segundo a direção NE-SW. O desenvolvimento de condutos mais extensos está associada a Falha Transtraccional Sinistral NE-SW.

Conforme a caracterização dos estratos carbonáticos, o nível da caverna, classificado como dismicrita/carbonato cristalino, mostrou-se muito resistente nos ensaios de compressão uniaxial, desgaste por abrasão e ataque químico, em relação aos níveis superior e intermediários (biopelosparito/grainstone).

A resistência do nível da caverna está atribuída a dois aspectos importantes: ao tipo de sedimentação e a mineralogia. O fácies do nível da caverna originou-se de uma sedimentação química (lama carbonática) por isso adquiriu caráter de maior densidade e menor porosidade e absorção d'água. A dolomitização ocorrida na diagênese contribuiu para a abundância do mineral dolomita no estrato.

Durante o processo natural de carstificação, o nível da caverna está menos suscetível a dissolução devido à presença da dolomita. Essa característica somada à baixa penetrabilidade d'água faz com que o ataque químico ocorra mais efetivamente nas superfícies expostas do material. Assim, o fácies se mantém pouco alterado ou inalterado com o passar do tempo.

A alta resistência à compressão uniaxial e ao desgaste abrasivo revelam que o estrato da caverna está menos sujeito as tensões naturais (esforços tectônicos e peso de camadas sobrejacentes) e às abrasões mecânicas naturais (circulação de águas, movimentação de sedimentos e crescimento de plantas e raízes), o que contribui para preservação do material por mais tempo.

A ocorrência de cavernas em um estrato tão resistente pode ser explicada pela existência de concentrações de cavidades centimétricas, denominadas como "porções cavernosas". Estas feições formaram-se devido ao processo de dolomitização, no qual a conversão da calcita para dolomita é acompanhada pela redução de aproximadamente 13% do volume rochoso, que é manifestada pelo aumento da porosidade (vazios). Com o avanço do dissolução na carstificação, os vazios tendem a crescer e a se unir, formando vazios maiores, que por sua vez poderão tornar-se futuras galerias de cavernas. Neste caso, a resistência do estrato acaba por ser um fator positivo para a preservação destas cavernas, pois dificilmente ocorrerão desmoronamentos e obstrução de condutos com a evolução do carste.

O fraturamento nos níveis mais resistentes também podem funcionar como local preferencial de formação de cavernas, principalmente se cruzar as porções cavernosas.

Diversas literaturas atribuem a formação de cavernas em regiões cársticas principalmente à presença de porosidade secundária (fraturamento) e rocha solúvel. Neste trabalho, identificou-se outro fator determinante para formação de cavernas no Lajedo do Rosário, a presença de um fácies mais resistente com porções cavernosas, originadas por dolomitização.

Ainda não se sabe se a formação de cavernas em outras regiões dos calcários da Formação Jandaíra estão associadas a esta mesma característica. Portanto, recomenda-se mais estudos de detalhe de caracterização faciológica para elucidação desse questionamento.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M., HASSUI, Y., BRITO NEVES, B. B. & FUCK, R. A. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 2., 1977, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, 1977. p.242-258.
- ANGELIM, L.A.A., Medeiros, V.C., Nesi, J.R. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife, 2006. 1 mapa color. Escala. 1:500.000.
- ARARIPE, P. T., FEIJÓ, F. J., Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.127-141. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15845/2010**: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12042/2012**: Materiais inorgânicos — Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro. 2012.
- AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SAADI, A. Ambientes cársticos. In: SOUZA, C.R.G; Suguio, K; Oliveira, A.M.S; Oliveira, P.E. (Org.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005. p. 321-342.
- BARBOSA, V. A C. **Tufas calcárias: Caracterização, classificação e gênese de cavernas, Felipe Guerra – RN**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- BARTLETT, W.L., FRIEDMAN, M., LOGAN, J. M. Experimental folding and faulting of rocks under confining pressure, part IX: wrench faults in limestone layers. **Tectonophysics**, v. 79, n. 3, p. 255-277. 1981.
- BENTO, D.M.; CRUZ, J. B.; FERREIRA, R.L., VERÍSSIMO, C.U.; XAVIER NETO, P. Mapeamento, Caracterização Ambiental e Relevância do Patrimônio Espeleológico de Felipe Guerra/RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., 2011. Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: Sociedade Brasileira de Geologia, 2011a. P.485-499. Disponível em: <[http://www.sbe.com.br/anais31cbe/31cbe\\_485-499.pdf](http://www.sbe.com.br/anais31cbe/31cbe_485-499.pdf)>. Acesso em: 24 jul. 2014.
- BENTO, D. M.; CRUZ, J. B.; SANTOS, D. J.; SOUZA, R. F. R.; CAMPOS, U. P.; FREITAS, J. I. M. **Relatório Final do Projeto Karst Jandaíra: Caracterização Ambiental e Mapeamento das Cavernas de Felipe Guerra e Do Sítio Espeleológico da Furna Feia e Áreas Cársticas Adjacentes**. Natal, p. 342, 2011b. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/kast-jandaira.html>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

BERTANI, R.T., I.G. COSTA & MATOS, R.M.D. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar, In: RAJA GABAGLIA, G.P. & MILANI, E.J. Origem e evolução de bacias sedimentares. **Petrobras**, Rio de Janeiro, p. 291-310. 1990.

BEZERRA, F.H.R.; LIMA Filho, F.P.; AMARAL, R.F.; CALDAS, L.H.O.; COSTA NETO, L.X. 1998. Holocene coastal tectonics. In: Stewart, I.S.; Vita-Finzi, C. (Ed.). **Coastal Tectonics**. London. v. 146, p.279-293. 1998.

BEZERRA, F. H. R.; VITA-FINZI, C. How active is a passive margin? Paleoseismicity in Northeastern Brasil. **Geology**, v.28, p. 591-594. 2000.

BEZERRA, F. H. R.; AMARO, V. E.; VITAFINZI, C.; SAADI, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. v14: 61-75. 2001.

BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M.; GESICKI, A.L.; SIAL, A.N.; FERREIRA, V.P.; FLEXOR, J.M.; Tufas Calcárias na Serra da Bodoquema, MS. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41., 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, 2002. p. 607-617.

CALDAS, L. H., CORIOLANO, A. C., DANTAS, E. P. & JARDIM DE SÁ, E. F. Os beachrocks no litoral do Rio Grande do Norte: potencial como marcadores neotectônicos. In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Nordeste, XVII., Fortaleza, **Atas...** Fortaleza, 1997, p.369-374.

CALDAS, L. H. O. **Geologia costeira da Região de São Bento do Norte e Caiçara, litoral norte Potiguar**. Monografia (Graduação em Geologia). Departamento de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 1996.

CALDAS, L. H. O., MEDEIROS, W. E., DANTAS, E. P., JARDIM de SÁ, E. F. Caracterização geológica e geofísica de uma estrutura na borda leste do graben de Umbuzeiro, Bacia Potiguar/RN, e implicações neotectônicas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1997, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1997, v. 2, p. 885-888.

CALDAS, L. H. O. **Estudo Geológico e Geofísico da Falha de Carnaubais, Bacia Potiguar – RN, e Implicações Neotectônicas**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1998.

CASSAB R. C. T. **Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos**. 2003. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.



CECAV - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. **Regiões Cársticas do Brasil**. 2009. 1 mapa, color. Escala 1:8.500.000. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>>. Acesso em: 29 abr. 2015.

CECAV - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. **Base de Dados Geoespacializados das Cavernas do Brasil**. 2013. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html>>. Acesso em: 01 dez. 2013.

COELHO, D. C. Fauna de morcegos no Carste de Felipe Guerra, RN. In: CRUZ, Jocy Brandão (Org.). **Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte**. Natal: ICMBIO. 2008.

CÓRDOBA, V. C. **A evolução da plataforma carbonática jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica**. 2001. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2001.

COSTA NETO, L.X. **Geologia da Área entre Macauzinho e Boa Vista - Sul de Macau - RN**. 1985. Monografia (Graduação em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 1985.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico do município de Felipe Guerra, estado do Rio Grande do Norte**. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Recife. 2005.

CREMONINI, O. A. A reativação tectônica da Bacia Potiguar no Cretáceo Superior. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 5., 1993, Gramado. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993. p.277-280.

CREMONINI, O. A. **Caracterização estrutural e evolução da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil**. 1993. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1993.

CREMONINI, O. A. & KARNER, G. D. Soerguimento termal e erosão na Bacia Potiguar submersa e seu relacionamento com a evolução da faixa equatorial brasileira. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, XVI., 1995, Recife. **Anais...** SGB/NE, 1995. V1. p.152-156.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 54, p. 207–250. 1970.

CRUZ, J. B., BENTO, D. M., BEZERRA, F. H. R., FREITAS, J. I., CAMPOS, U. P., SANTOS, D. J. Diagnóstico Espeleológico do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 01, p. 01-24. 2010.

CRUZ JÚNIOR, F.W. **Sistemas deposicionais, geomorfologia e geologia estrutural de uma área na Região de Felipe Guerra, Sudoeste da Bacia**

**Potiguar**. 1996. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1996.

CVIJIĆ, J. Morphologische und glacielle Studien aus Bosnien, der Hercegovina und Montenegro: die Karst-Poljen. **Abhandlungen Der Geographie Gesellschaft Wien**, v. 3(2), p. 1-85. 1901.

CVIJIĆ, J. Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst. **Hydrographie Souterraine Et Evolution Morphologique Du Karst**, v. 6(4), p. 375-426. 1918.

CVIJIĆ, J. **Das Karstphänomen, Versuch einer morphologischen Monographie. Geographische Abhandlungen, herausgegeben von Prof. Dr Albrecht Penck**. V. 3, p. 217-329. 1889.

DANTAS, E. P. **Gravimetria e sensoriamento remoto: Uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 1998.

DANTAS, A. R. **Mapeamento estrutural da porção central e sudeste da Falha de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar/RN**. 2004. Monografia (Graduação em Geologia), – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte., Natal, 2004.

DAVIS, G. H., BUMP, A.P., GARCIA, P.E., AHLGREN, S.G. **Conjugate Riedel deformation band shear-zones**. **Journal of Structural Geology**, v. 22, p. 169–190. 1999.

DELLA FÁVERA, J.G. **Fundamentos da Estratigrafia Moderna**. Rio de Janeiro. Ed. UERJ, 2001. 263 p.

DIAS-BRITO, D. Calcisphaerulidae e microfóssies associados da Formação Ponta do Mel – Bacia Potiguar, Brasil: considerações paleoecológicas e biocronoestratigráficas. In: **Coletânea de Trabalhos Paleontológicos**. Rio de Janeiro: DNPM, p. 307-313. 1985.

DUNHAM, R. J. 1962. In: \_\_\_\_\_ **Petrografia Básica: textura, clasificación y nomenclatura de rocas**. Madrid: Paraninfo, 1989. Cap. 3., p. 78-92.

FERREIRA, R.L., PROUS, X., SOUZA-SILVA, M. & BERNARDI, L.F.O. Caracterização biológica de cavernas do Rio Grande do Norte. In: CRUZ, J. B. (Org.). **Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte**. Natal: ICMBIO. 2008.

FERREIRA, R.L.; PROUS, X.; BERNARDI, L.F.O.; SOUZA-SILVA, M. Fauna subterrânea do Estado do Rio Grande do Norte: Caracterização e impactos. **Revista Brasileira de Espeleologia**. v. 01, p. 25-35. 2010.

FOLK 1959, 1962. In: \_\_\_\_\_ **Petrografia Básica: textura, clasificación y nomenclatura de rocas**. Editorial Paraninfo, Madrid, 1989. Cap. 3, p. 78-92.

- FONSECA, V. P. **Estudos Morfo-tectônicos na área do baixo curso do Rio Açu (Açu-Macau) – Rio Grande do Norte**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- FORD, D. C.; WILLIAMS, P.W. **Karst geomorphology and hidrology**. United Kingdom: Wiley. 2007.
- FRANÇOLIN, J. B. L. & SZATIMARI, P. Mecanismos de Rifteamento da Porção Oriental da Margem Norte Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p. 196-207. 1987.
- GALINDO, A. C., Maia H. N., Souza L. C. de; Srivastava, N. K., Fillippi, R. R., Oliveira, M. T. D. de, Araújo, A. G. dos S. **Carta Geológica da Folha Apodi SB.24-X-C-VI**. Natal, 2012. 1 mapa color. Escala 1:100.000.
- GOMES, I. P. **Influência do fraturamento na formação de feições cársticas no Calcário Jandaíra, Felipe Guerra – RN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.
- HACKSPACHER PC, CORSINO AR, SRIVASTAVA NK & TIRIBA VF. A Falha de Afonso Bezerra como evidência de significativo tectonismo frágil NW-SE, na Bacia Potiguar emersa - RN. **Boletim do Departamento de Geologia/UFRN**. Natal, v. 10: p. 33-44. 1985.
- HOERLLE, M. R.; Gomes, C. J. S.; Matos, R. M. D. de. O Graben de Apodi, região sudoeste da bacia Potiguar, RN, uma interpretação com base em seções sísmicas e dados de poços. **Revista Escola de Minas**. v. 60, n. 4, p. 593-602. 2007.
- IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente. **Perfil do seu município – Felipe Guerra**. Rio Grande do Norte. 2008 Disponível em: <<http://www.idema.gov.br>>. Acesso em: 24 abr. 2012.
- JENNINGS, J. N. **Karst geomorphology**. Oxford: Basil Blackwell, 1985. 293 p.
- KARMANN, I. O ciclo da água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 568 p.
- KLIMCHOUK, A.B., Ford, D.C., Palmer, A., Dreybrodt, W. Speleogenesis: **Evolution of Karst Aquifers**. Hunts-ville: National Speleological Society, 2000. p. 244–260.
- KOHLER, H. C. Geomorfologia cárstica. In: TEIXEIRA, A. J. G.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1995. p. 309-334.
- LANDES, K.K. Porosity through dolomitization. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 30, p. 305–318. 1946.

LIMA, C. C., VIVIERS, M. C., MOURA, J. R. S., SANTO, A. M., CARMO, I. O. O Grupo Barreiras na Bacia Potiguar: relações entre o padrão de afloramento, estruturas pré-brasilianas e neotectonismo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal. **Anais...** Natal: SBG/NE, 1990, v. 2., p. 607-620.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F.H.B. Geomorfologia e Neotectônica da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró NE/Brasil. **Revista Mercator**. Fortaleza, v. 11, p. 209-228, 2012. Disponível em: <<http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/736/408>> Acesso em: 20 abr. 2013.

MAIA, R. P.; SOUSA, M. O. L.; BEZERRA, F. H. R.; NETO, P. X.; MOURA LIMA, E. N. de; SILVA, C. C. N. da; SANTOS, R. D. A importância do controle tectônico para a formação da paisagem cárstica na Bacia Potiguar, nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 4. 2012.

MALIVA, R. G.; CLAYTON, E. A.; MISSIMER, T. M.; DICKSON, J. A. D. Insights Into the Dolomitization Process and Porosity Modification in Sucrosic Dolostones, Avon Park Formation (Middle Eocene), East-Central Florida, U.S.A. **Journal of Sedimentary Research**, Boulder, v. 81, p. 218-232. 2011.

MATOS, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. **Tectonics**, v.11 n. 4, p.766-791. 1992.

Melo, A. H. de. **Ocorrência e interpretação genética da dolomita na Formação Jandaíra (Bacia Potiguar, nordeste do Brasil)**. 2010. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

MILONOVIC, P. **Karst hydrogeology**. Littleton, Colorado: Water Resources. 1981. 434 p.

MOURA, E. N. **Mapeamento Estrutural na Região de Felipe Guerra - RN, Bacia Potiguar**. 2014. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2004.

MOURA-LIMA, E. N.; SOUSA, M. O. L.; BEZERRA, F. H. R.; AQUINO, M. R.; VIEIRA, M. M.; LIMA-FILHO, F. P.; FONSECA, V. P.; AMARAL, R. F. Sedimentação e deformação Tectônica cenozóicas na porção central da Bacia Potiguar. **Geologia USP**, São Paulo, v. 10, 2010.

MOURA LIMA, E. N.; SOUSA, M. O. L.; BEZERRA, F. H. R.; DE CASTRO, D. L.; DAMASCENA, R.V.C.; VIEIRA, M. M.; LEGRAND, J. M. Reativação Cenozóica do Sistema de Falhas de Afonso Bezerra, Bacia Potiguar. **Geociências**, São Paulo, v. 30, p. 77-93. 2011.

MURRAY, R.C. Origin of porosity in carbonate rocks. **Journal of Sedimentary Petrology**, McLean, v. 30, p. 59–84. 1960.

NASCIMENTO, J. R. D. do. **Prospecção espeleológica de dolinas e cavernas e seus controles estruturais na área 3D boa esperança – município de Felipe Guerra, RN.** 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

NETO, O. C. P.; SOARES, U. M.; SILVA, V. A. J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P. E SOUSA, C. A. V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 357-369. 2007.

NEVES, C. A. O. **Análise regional do trinômio geração-migração-acumulação de hidrocarbonetos na seqüência continental Eocretácea da Bacia Potiguar emersa, NE do Brasil.** 1987. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 1987.

NOGUEIRA, F. C. C; BEZERRA, F. H. R; CASTRO, D. L. Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar. **Geologia USP**, São Paulo, v. 6, n.2. 2006.

OLIVEIRA, I. P. M. R. De. **Barramentos naturais no Vale do Rio Peruaçu: consequências ecológicas e ambientais de eventos pretéritos e futuros.** 2008. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

PALMER, A. N. Origin and morphology of limestones caves. **Geological Society of America Bulletin**, Oneonta, v. 103, p. 1-21. 1991.

PETTIJOHN, F.J. **Sedimentary rocks.** New York: Harper and Brotthers. 1957.

PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú: Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.** 1998. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PILÓ, L. B. Geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** Uberlândia, v. 1, n. 1, p. 88-102. 2000.

PROASNE – Projeto água subterrânea do nordeste do Brasil. **Modelamento matemático da área de recarga do aquífero Açú.** Rio Grande do Norte. 2006. <<http://proasne.net/acufinalreport.html>>. Acesso em: 24 abr. 2012.

RAILSBACK, L. B. **Solubility of common carbonate minerals.** 2006. Disponível em: <<http://www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/820HMC-LMCSolubilities05LS.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2014.

RAMOS NETO, B. de A. 2012. **Espeleometria e controle estrutural na gênese das feições cársticas superficiais da caverna Cathedral, município de Felipe Guerra – RN.** 2012. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

REYES PEREZ, Y. A. **Caracterização da Geometria de Depósitos Sedimentares na Borda Sudoeste da Bacia Potiguar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Centro de ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2003.

SANTOS, J. L. dos. **Controle estrutural e litológico na gênese de cavernas e feições cársticas no lajedo de Furna Feia, município de Baraúna – RN**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

SANTOS, O. M. dos; CUNHA, H. E. S. **Controle Estrutural da Caverna Complexo Suíço no Lajedo do Rosário, Felipe Guerra (RN)**. 2011. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R. & ASMUS, H.E. **Mapa geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente Incluindo Depósitos Minerais**: Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília 1981. 1 mapa, color. Escala 1:2.5000.000.

SIAL, A. N. Significado tectônico de posicionamento de rochas basálticas Pós-Paleozóicas do nordeste brasileiro. **Boletim SBG/NE**. v. 3, p.35-51. 1975.

SILVA, F.J. Invertebrados de cavernas de Felipe Guerra. In: CRUZ, J. B. (Org.). **Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte**. Natal: ICMBIO, 2008. 78 p.

SILVA, K. F. da . 2011. **Espeleometria e controles estrutural e litológico na gênese da caverna do Desafio situada em Felipe Guerra, RN**. 2011. Monografia (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SIAGAS-SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Fichas de poços tubulares**. 2012. Disponível em <[http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa\\_complexa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php)>. Acesso em: 26 abr. 2012.

SOUZA, S.M. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 5. p. 181-183.

SUGUIO, K., MARTIN, L., BITTENCOURT, A. C. S. P, DOMINGUEZ, J. M. L. & FLEXOR, J. M. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 15, p.273-286. 1985.

SUN, Q.S. Dolomite Reservoir: Porosity Evolution and Reservoir Characteristics. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 79, n. 2, p. 186 - 205, 1995.

SRIVASTAVA, N.K; CORSINO S.R. Os carbonatos de Touros: Petrografia e Estratigrafia. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 11, 1984, Recife. **Atas...** Recife: SBG, 1984, p. 165-176.

TIBANA, P. & TERRA, G. J. S. Sequências carbonáticas do cretáceo da Bacia Potiguar. **Boletim Técnico da Petrobras**. v. 24, n.3, p. 174-183. 1981.

TRAVASSOS, L. E. P. **Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010.

VAN TUYL, F.M. The origin of dolomite. **Iowa Geological Survey**, Annual Report, v. 25, p. 253–421. 1914.

VASCONCELOS, E. P., LIMA NETO, F. F.; ROOS, S. Unidades de correlação da formação Açú-Bacia Potiguar. In: Congr. Bras. Geol., 36, 1990, Natal, **Anais...** Natal: SBG/Núcleo Nordeste, 1990. p. 227-240.

WEYL, P.K. Porosity through dolomitization: conservation of mass requirements. **Journal of Sedimentary Petrology**, McLean, v. 30, p. 85–90. 1960.

WHITE, W. B. **Geomorphology and hydrology of karst terrains**. New York: Oxford University, 1988. 464 p.

WILLIAMS, P. **World Heritage caves and karst: A thematic study**. Gland, Switzerland: IUCN. Programme on Protected Areas. 2008.

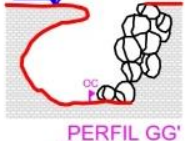
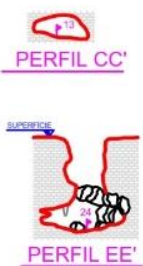
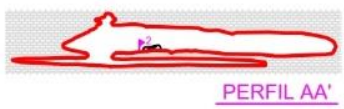
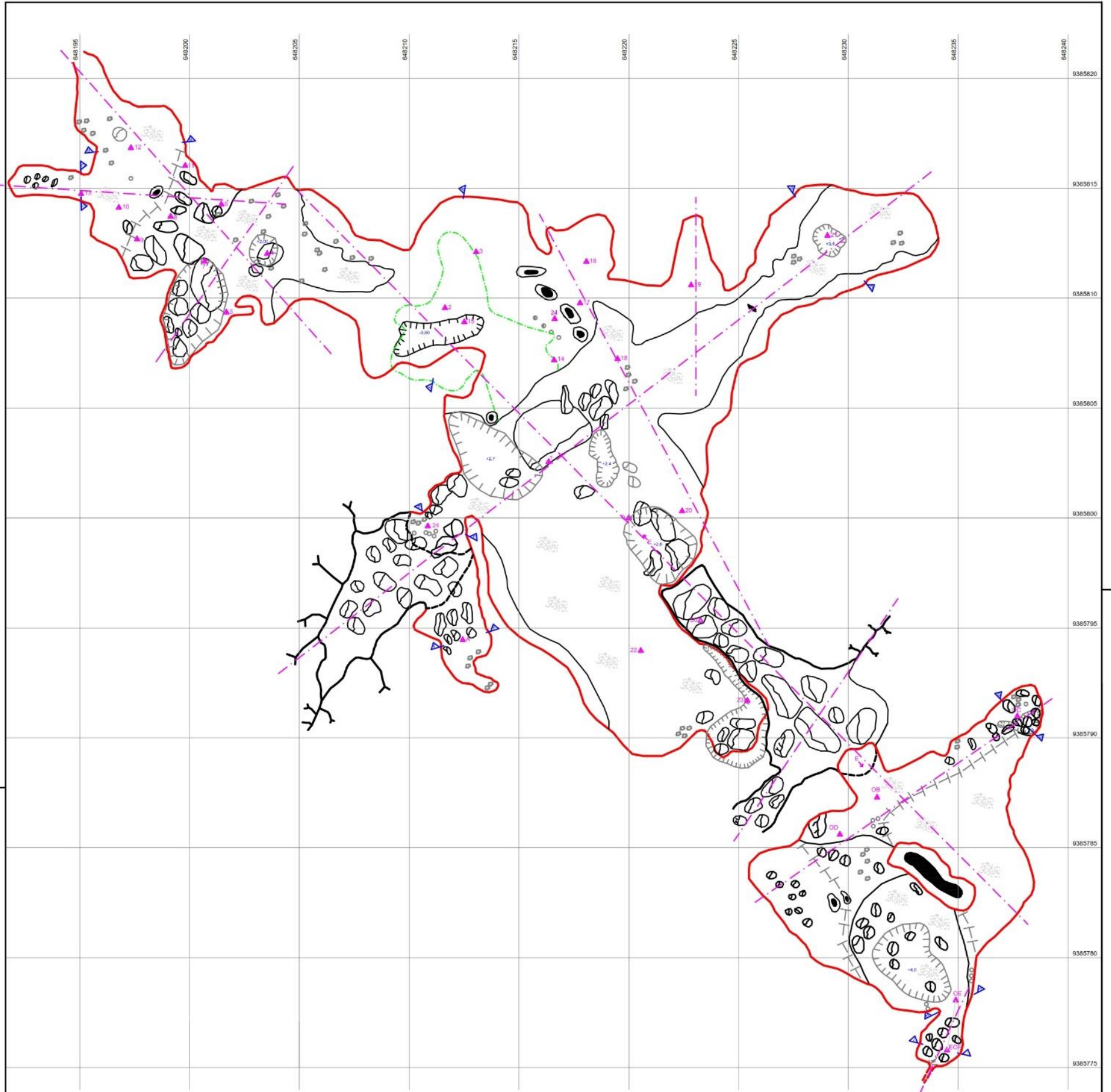
WILLIAMS, P.; FONG, Y.T. **World map of carbonate rock outcrops v3.0**. SGGES/UNIVERSITY of Auckland: New Zealand. 2010. Disponível em: <[http://www.sges.auckland.ac.nz/sges\\_research/karst.shtm](http://www.sges.auckland.ac.nz/sges_research/karst.shtm)>. Acesso em: 29 abr. de 2015.

WOODCOCK, N.H. & SCHUBERT, C. Continental strike-slip tectonics. In: Hancock, P. L. (ed.). **Continental deformation**. Oxford: Pergamon press, 1994. p. 251-263

**Anexo 1 – Mapas das cavernas mapeadas no Lajedo do Rosário**

Fonte: Modificado de Bento *et al.*, 2011b.



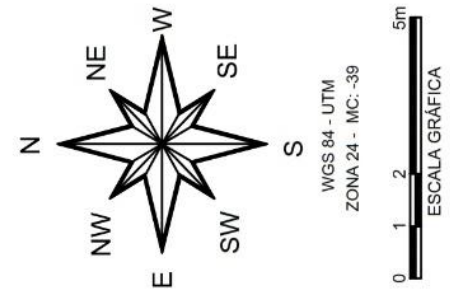
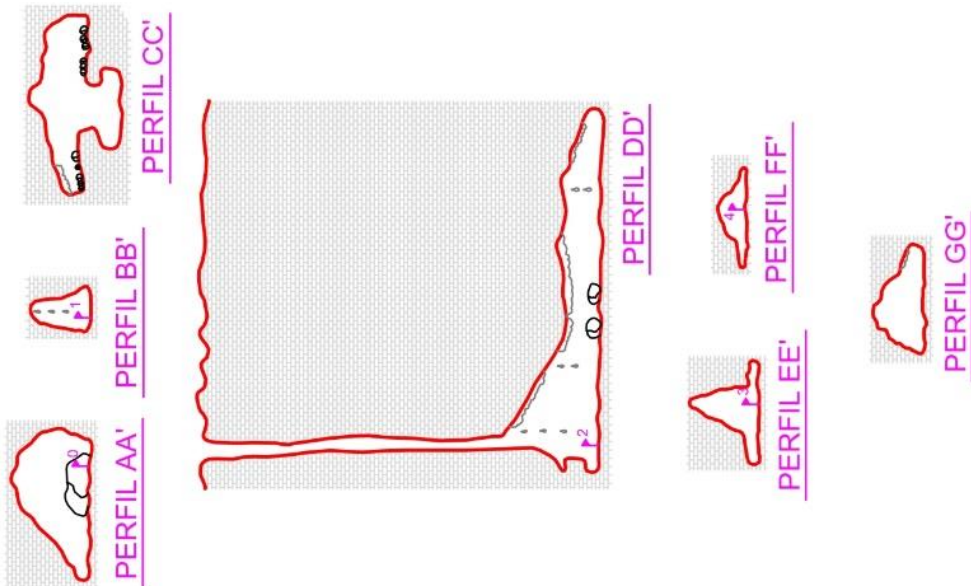
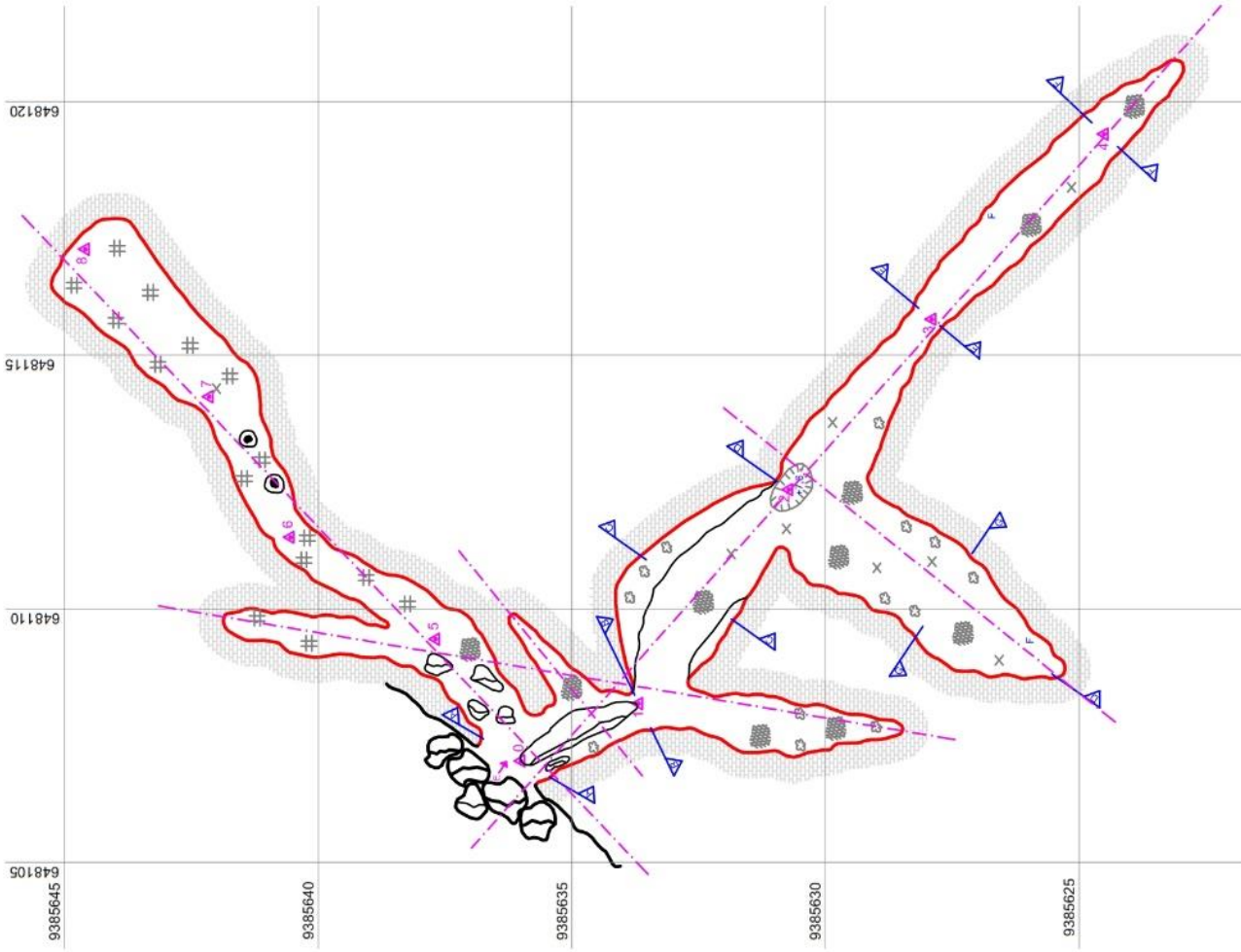


**CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**

- BASE FIXA
- BASE TEMPORÁRIA
- CONTOURNO INTERNO DA CAVERNA
- CONTOURNO DA GALERIA NÃO TOPOGRÁFICA OU INEXPLORÁVEL
- CONTOURNO EXTERNO DA CAVERNA
- BLOCOS SOLTOS
- NÍVEL ACENTUADO
- CALCÁRIO
- ESTALACTITE
- SOLONCHALE
- ENTRADA DA CAVERNA
- ÁREA
- CLARABOIA
- POÇO
- CONTOURNO DA GALERIA INFERIOR
- TETO BAIXO
- COUVE-FLORES
- FRATURA MAPEADA OU INFERIDA

	<b>PROJETO:</b> <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>		
	NOME DA CAVIDADE: <b>CAVERNA DONA TEREZA</b>	LOCAL: <b>LAJEDO DO ROSÁRIO</b>	MUNICÍPIO / UF: <b>FELIPE GUERRA / RN</b>
COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO: <b>648 220E, 9 385 800N / 82m / 0</b>	DESENH. VERT. / PROJ. HORIZ. DA CAVIDADE: <b>139,9 m-DESCONTINUIDADE / 137,4 m</b>	DESNÍVEL TOTAL: <b>3,7 m</b>	
MÉTODO DE MAPEAMENTO: <b>BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO</b>	PRECISÃO: <b>BCRA - 3C</b>	LITOLOGIA: <b>CALCÁRIO</b>	
EQUIPE TOPOGRÁFICA: <b>DEBORA MACÉDO, HARLEM ENCKEL, EDUARDO, JEFERSON LIMA, BRUNO FARIAS, ALEXSANDRO GARCÉS E VANUSA CASTELO</b>			
COORDENADOR DO PROJETO: <b>CÉSAR U. V. VERÍSSIMO</b>	LAYOUT: <b>JEFERSON LIMA</b>	DATA DO MAPEAMENTO: <b>JANEIRO/2010</b>	

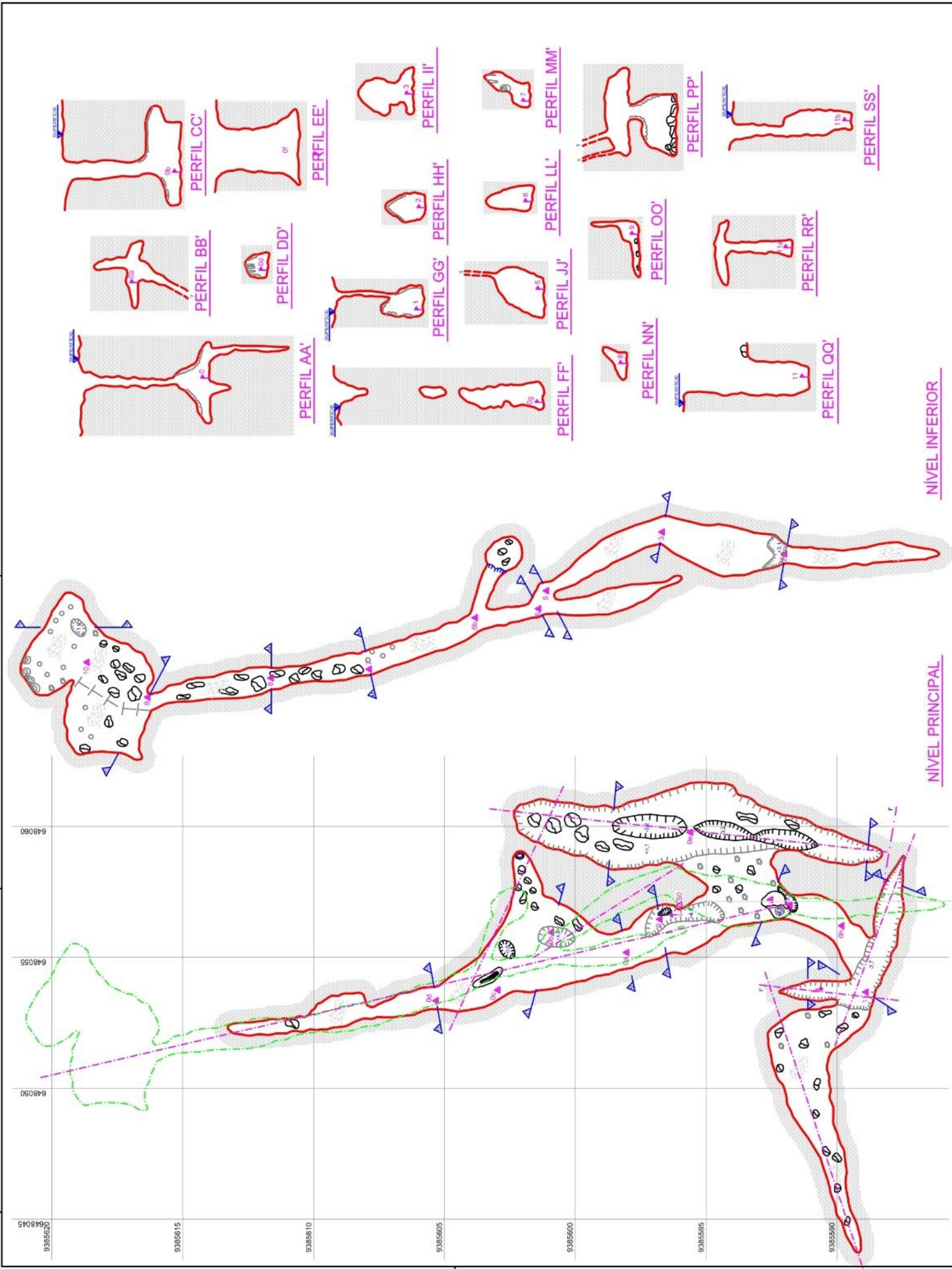




**CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**

	BASE FIXA		ENTRADA DA CAVERNA
	BASE TEMPORÁRIA		ÁREA
	CONTORNO DO NÍVEL PRINCIPAL (NÍVEL 0)		CLABOIA
	CONTORNO DA GALERIA NÃO TOPOGRAFADA OU INEXPLORAVEL		POÇO
	CONTORNO EXTERNO DA CAVERNA		TETO BAIXO
	BLOCOS SOLTOS		COUVE-FLOR
	DESNÍVEL ACENTUADO		ARGILA
	ESTALACTITE		COLUNA
	CALCÁRIO		FRATURA MAPEADA OU INFERIDA

		<b>PROJETO:</b> <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>	
<b>NOME DA CAVIDADE:</b> CAVERNA JEFFERSON	<b>LOCAL:</b> LAJEDO DO ROSARIO	<b>MUNICÍPIO / UF:</b> FELIPE GUERRA / RN	
<b>COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO:</b> 648.587E, 9.385.261N / 100m / S0	<b>DESENV. VERT. - MÉTODO / PROJ. HORIZ.:</b> 42,1 m - DESCONTINUIDADE / 41,8 m	<b>DESNÍVEL TOTAL:</b> 7,6 m	
<b>MÉTODO DE MAPEAMENTO:</b> BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	<b>PRECISÃO:</b> BCRA - 3C	<b>LITOLOGIA:</b> CALCÁRIO	
<b>EQUIPE TOPOGRÁFICA:</b> VANUSA CASTELO, FOO KLEISON, OSÉAS MARÇAL, JEFFERSON LIMA, JEFFERSON REGIS, JORGE BRUNO, ELENILZA GOMES, LUIZ HENRIQUE, RAFAEL SARAIVA			
<b>COORDENADOR DO PROJETO:</b> CÉSAR U. V. VERÍSSIMO	<b>LAYOUT:</b> JEFFERSON LIMA	<b>DATA DO MAPEAMENTO:</b> 10/10/2010	

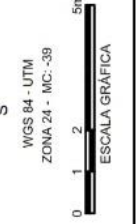


NÍVEL INFERIOR

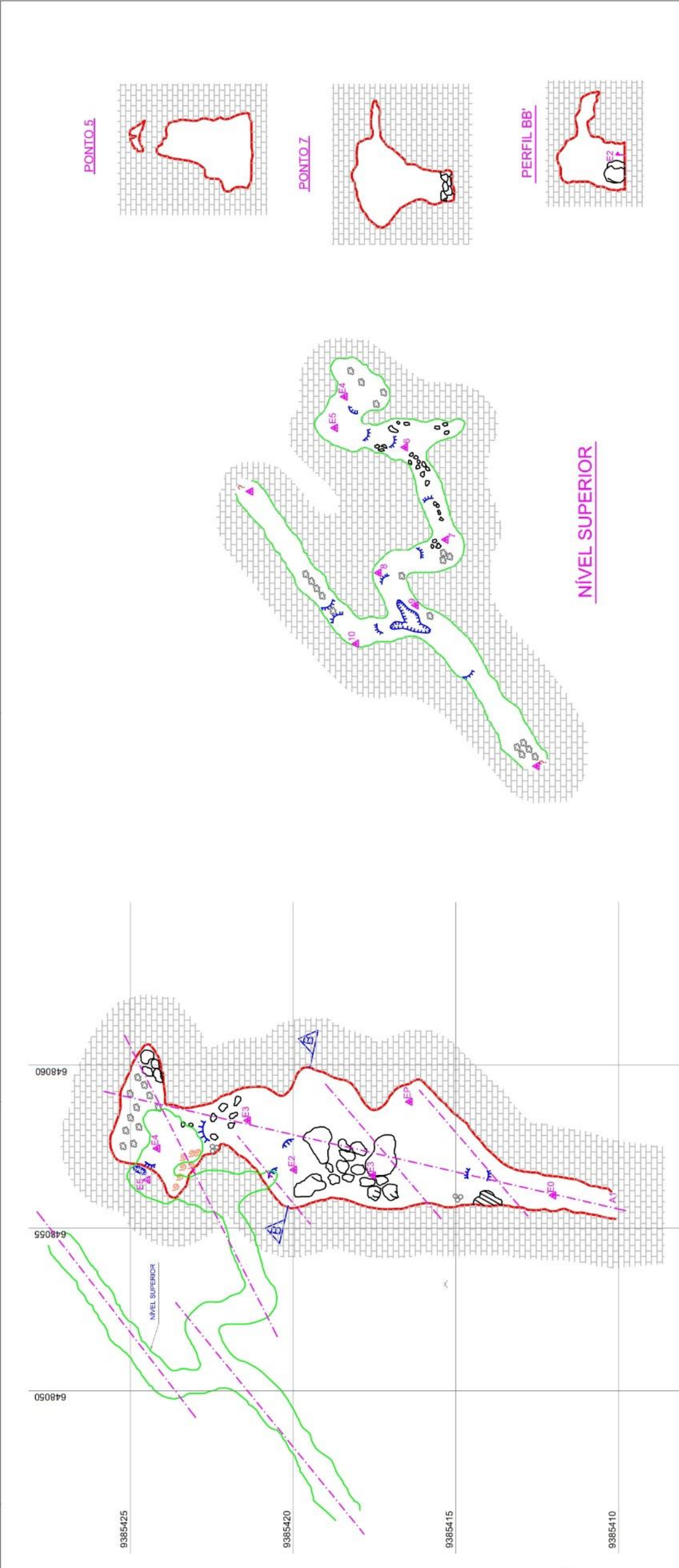
NÍVEL PRINCIPAL

CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS

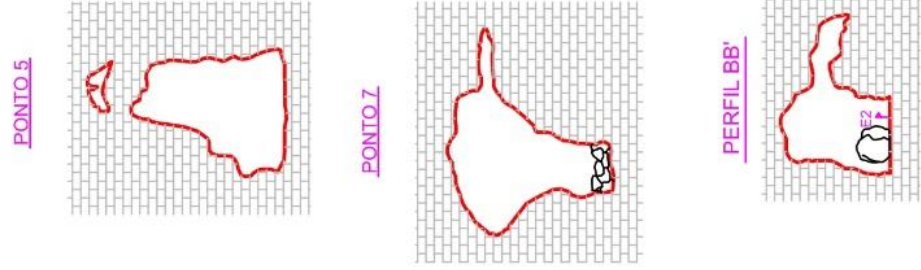
- BASE EXTA
- BASE TEMPORÁRIA
- CONTORNO DO NÍVEL PRINCIPAL (NÍVEL D)
- NÍVEL INFERIOR
- CONTORNO DA GALERIA MÃO TOPOGRAFADA OU MEDIDA
- CONTORNO EXTERNO DA CAVERNA
- ENTRADA DA CAVERNA
- ÁREA
- CLAREIRA
- POÇO
- TETO BANDO
- CAUZE FLOR
- FRAZURA MARCADAS OU INFERIDA
- ESCORRIMENTO CALCÍFICO
- COLUNA
- DEBRULHA ACENTUADO
- ESTALACTITE
- CALÁRIO
- SOCCOS SOLOS



PROJETO: <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>	MUNICÍPIO / UF: FELIPE GUERRA / RN
LOCAL: LAJEDO DO ROSÁRIO	DESNÍVEL TOTAL: 8,3 m
COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO: 648 587E 9 385 261N / 100m / SO	REGRAS: SCA - 3C
MODO DE MAFAMENTO: BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	EQUIPE TOPOGRÁFICA: VANUSA CASTELO, FCO KLEISON, OSEAS MARÇAL, JEFFERSON LIMA, JEFFERSON REGIS, JORGE BRUNO, ELENILZA GOMES, LUIZ HENRIQUE, RAFAEL SARAVÁ
COORDENADOR DO PROJETO: CESAR U. V. VERRISSIMO	DATA DO MAFAMENTO: 10/10/2010



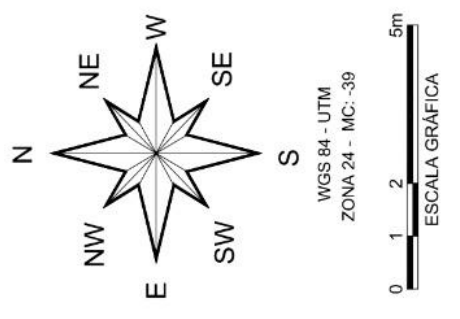
**NÍVEL PRINCIPAL**



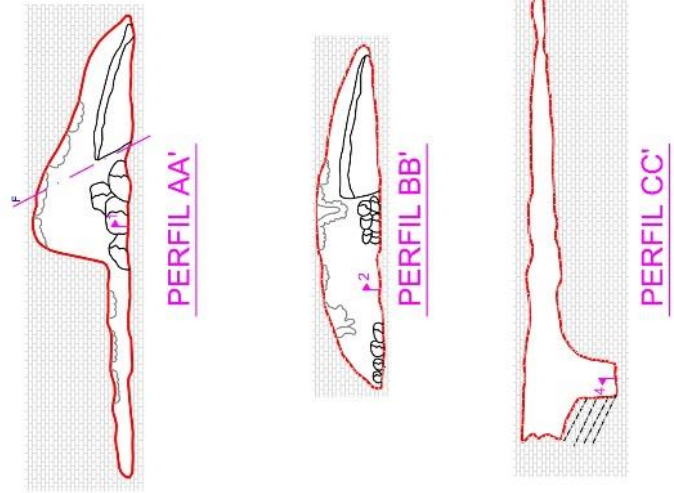
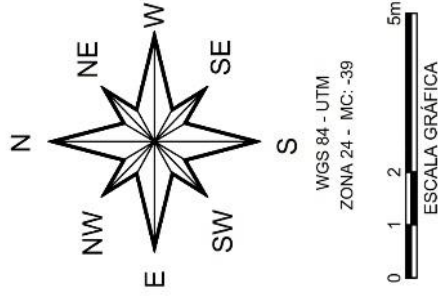
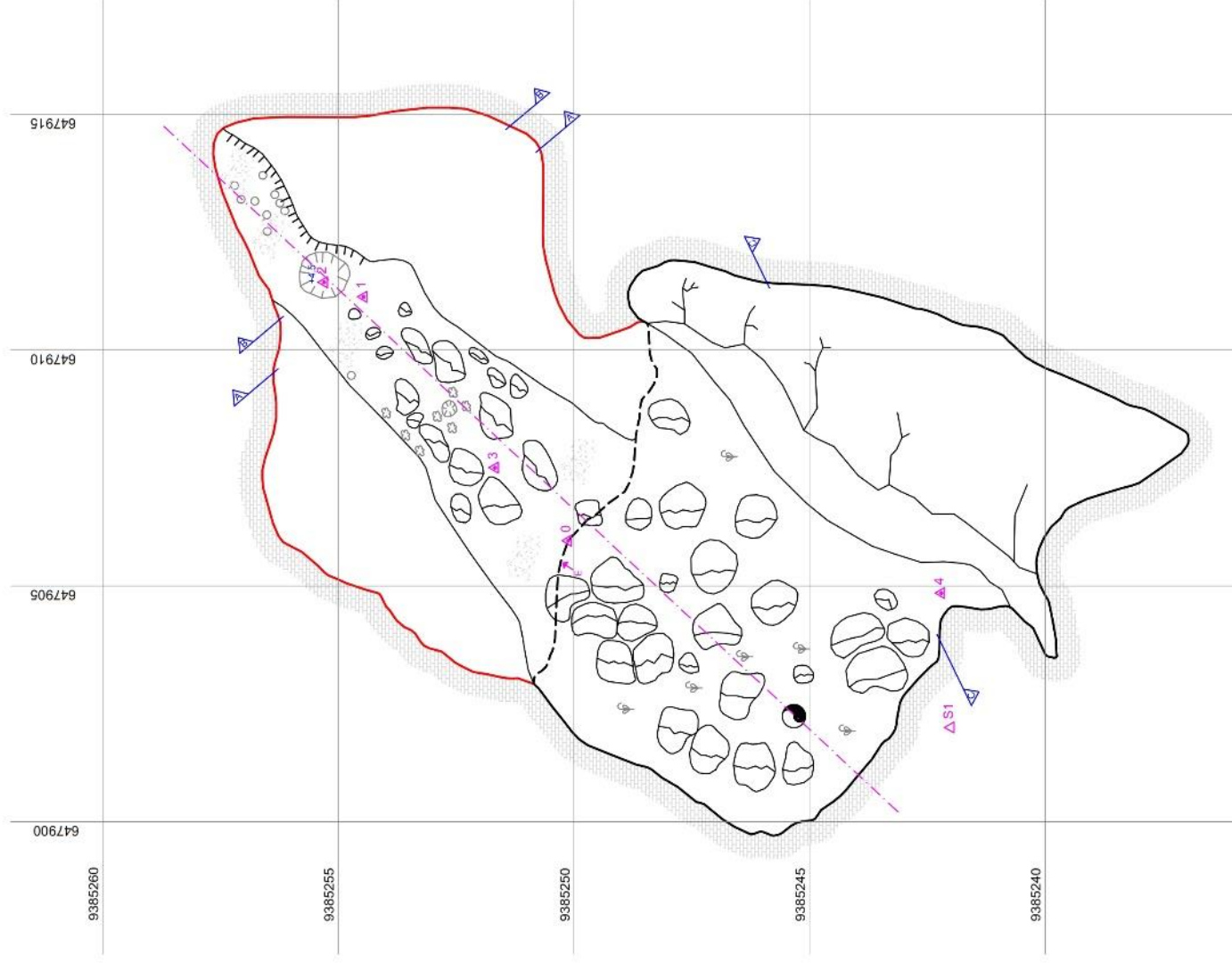
**NÍVEL SUPERIOR**

**CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**

- |  |                             |  |                    |
|--|-----------------------------|--|--------------------|
|  | BASE FIXA                   |  | ENTRADA DA CAVERNA |
|  | BASE TEMPORÁRIA             |  | ÁREA               |
|  | CONTORNO DO NÍVEL SUPERIOR  |  | ÂNGULO             |
|  | ESTALACTITE                 |  | COUVE-FLOR         |
|  | CONTORNO DO NÍVEL PRINCIPAL |  | CALCÁRIO           |
|  | BLOCOS SOLTOS               |  | POÇO               |
|  | DESNÍVEL ACENTUADO          |  | CARAMELUS          |
|  | FRATURA MAFEADA OU INFERIDA |  |                    |



 	<b>PROJETO:</b> <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>	<b>MUNICÍPIO / UF:</b> FELIPE GUERRA / RN
	<b>LOCAL:</b> LAJEDO DO ROSÁRIO	<b>DESNÍVEL TOTAL:</b> 3,5 m
<b>NOME DA CAVIDADE:</b> CAV. DAS PAREDES DE COUVE-FLOR	<b>COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO:</b> 648.056E, 9.385.412N / 73m / E0	<b>DESENV. VERT. / PROJ. HORIZ. DA CAVIDADE:</b> 38,2 m-DESCONTINUIDADE / 34,4 m
<b>METODO DE MAPEAMENTO:</b> BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	<b>PRECISÃO:</b> BCRA - 3C	<b>LITOLOGIA:</b> CALCÁRIO
<b>EQUIPE TOPOGRÁFICA:</b> KLEISON, LUIZ HENRIQUE, DÉBORA, BENTO, REGIS, JORGE BRUNO E RAFAEL		
<b>COORDENADOR DO PROJETO:</b> CESAR U. V. VERISSIMO	<b>LAYOUT:</b> CLISTENES BATISTA	<b>DATA DO MAPEAMENTO:</b> JAN/2010



**CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**

- BASE TEMPORÁRIA
- BASE FIXA
- CONTORNO DO NÍVEL PRINCIPAL (NÍVEL 0)
- CONTORNO EXTERNO DA CAVERNA
- BLOCOS SOLTOS
- DESNÍVEL ACENTUADO
- ESTALACTITE
- CALCÁRIO
- ENTRADA DA CAVERNA
- AREIA
- CLARABÓIA
- TETO BAIXO
- COUVE-FLOR
- FRATURA MAPEADA OU INFIRIDA
- ARGILA
- ÁRVORE (CRAIBEIRA)

<b>PROJETO:</b>		<b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>	
<b>NOME DA CAVIDADE:</b>	<b>LOCAL:</b>	<b>MUNICÍPIO / UF:</b>	<b>FEELIPE GUERRA / RN</b>
<b>CAVERNA CRAIBEIRA</b>	<b>LAJEDO DO ROSÁRIO</b>	<b>DESENV. VERT. -MÉTOD. / PROJ. HORIZ.:</b>	<b>3,4 m</b>
<b>COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO:</b>	<b>648.587E, 9.385.261N / 100m / S0</b>	<b>MÉTOD. DE MAPEAMENTO:</b>	<b>BCRA - 3C</b>
<b>BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO</b>	<b>PRECISÃO:</b>	<b>LITOLOGIA:</b>	<b>CALCÁRIO</b>
<b>EQUIPE TOPOGRÁFICA:</b>	<b>YANUSA CASTELO, FCO KLEISON, OSÉAS MARÇAL, JEFFERSON LIMA, JEFFERSON REGIS, JORGE BRUNO, ELENILZA GOMES, LUIZ HENRIQUE, RAFAEL SARAINA</b>		
<b>COORDENADOR DO PROJETO:</b>	<b>CESAR U. V. VERÍSSIMO</b>	<b>LAYOUT:</b>	<b>JEFFERSON LIMA</b>
<b>DATA DO MAPEAMENTO:</b>	<b>10/10/2010</b>		

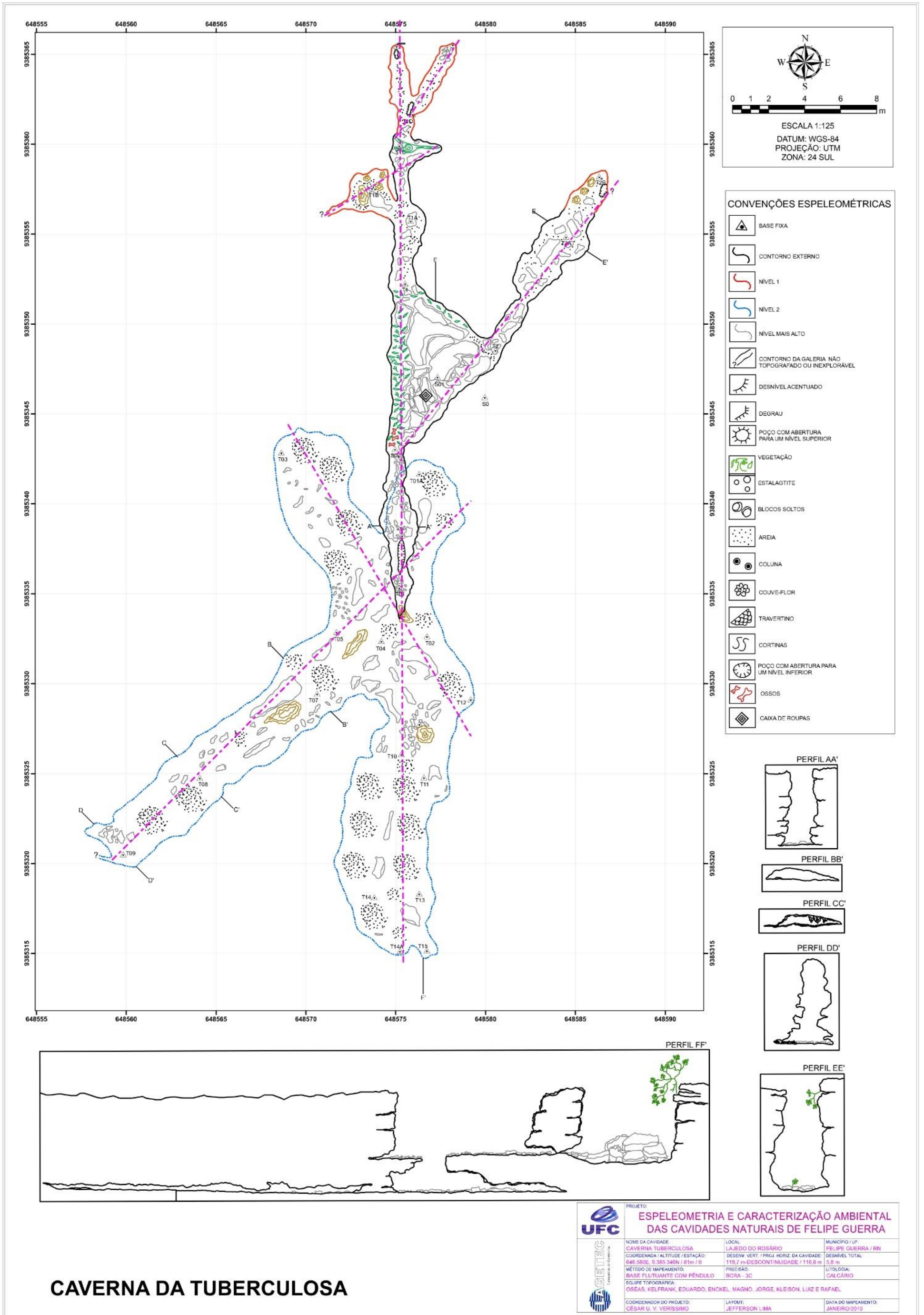












ESCALA 1:125  
 DATUM: WGS-84  
 PROJEÇÃO: UTM  
 ZONA: 24 SUL

**CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**

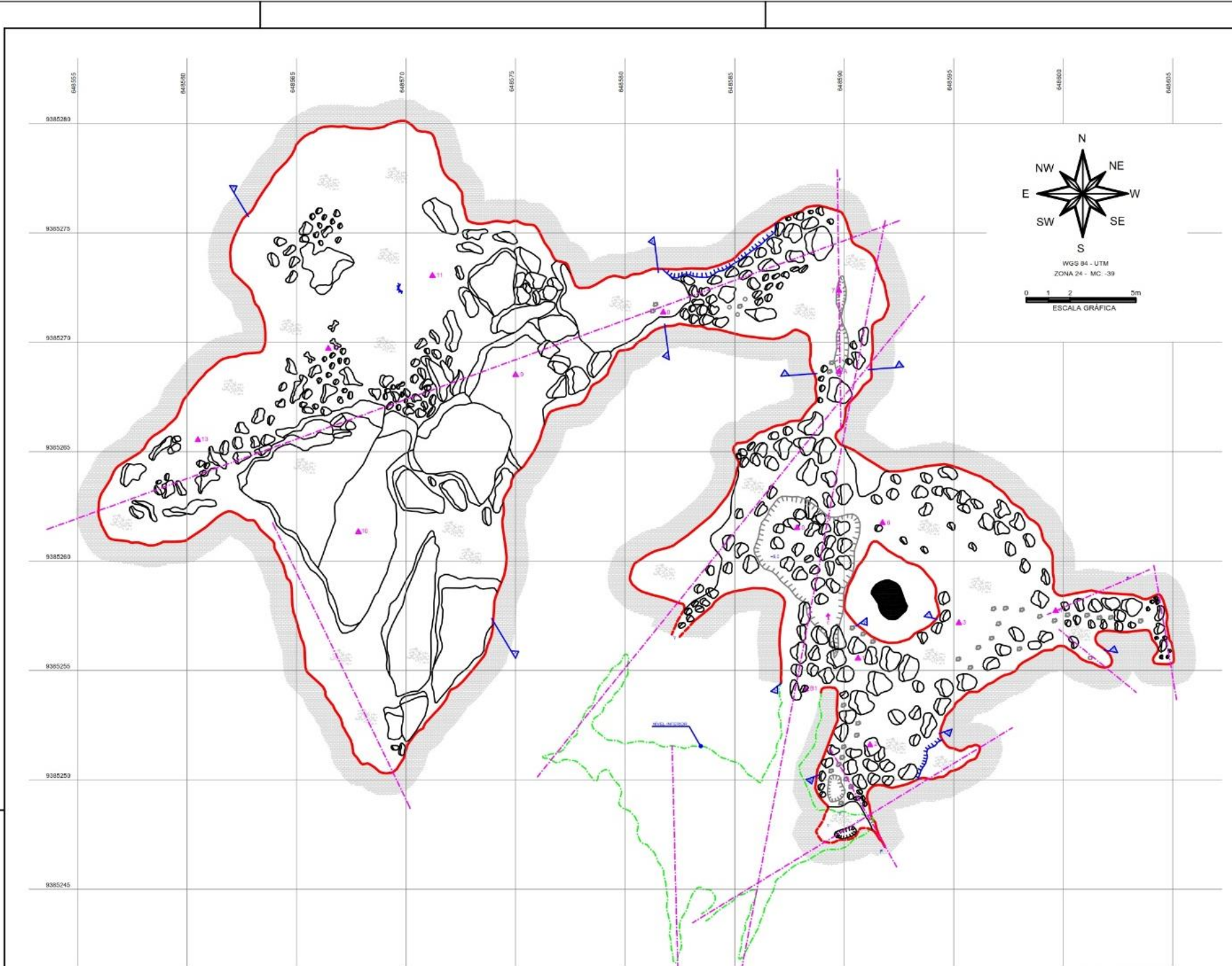
- BASE FIXA
- CONTORNO EXTERNO
- NÍVEL 1
- NÍVEL 2
- NÍVEL MAIS ALTO
- CONTORNO DA GALERIA NÃO TOPOGRAFADO OU INEXPLORÁVEL
- DESNÍVEL ACENTUADO
- DEGRAU
- POÇO COM ABERTURA PARA UM NÍVEL SUPERIOR
- VEGETAÇÃO
- ESTALAGITE
- BLOCOS SOLTOS
- AREIA
- COLUNA
- COUVE-FLOR
- TRAVERTINO
- CORTINAS
- POÇO COM ABERTURA PARA UM NÍVEL INFERIOR
- OSSOS
- CAIXA DE ROUPAS

PERFIL AA'  
  
 PERFIL BB'  
  
 PERFIL CC'  
  
 PERFIL DD'  
  
 PERFIL EE'

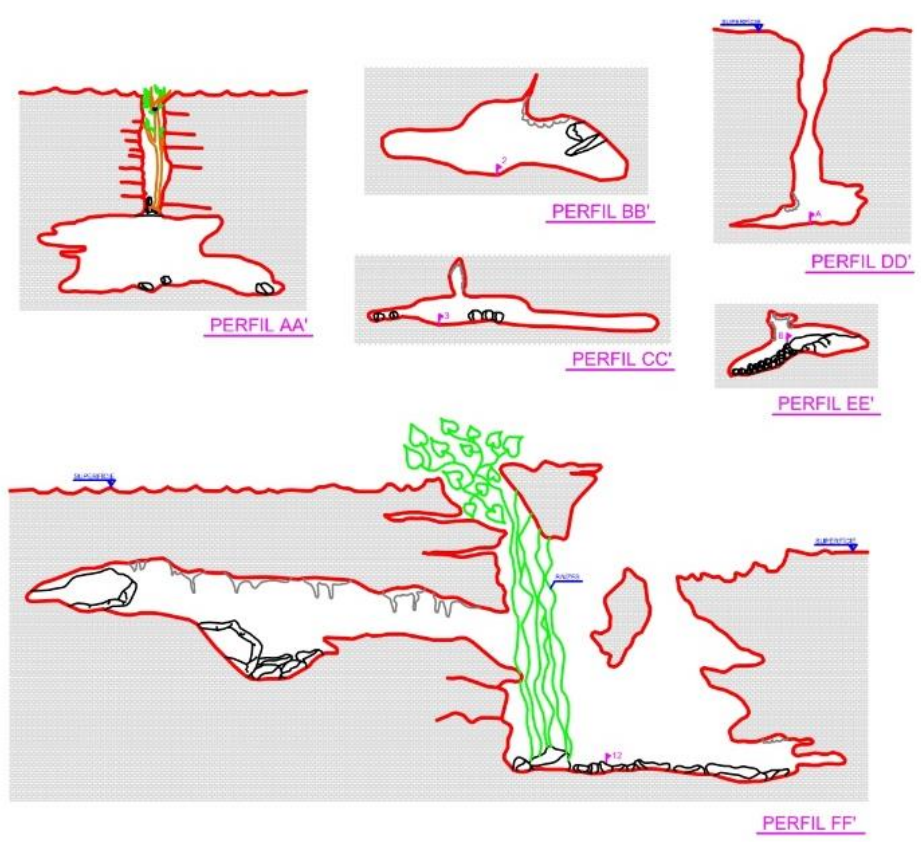
PERFIL FF'

**CAVERNA DA TUBERCULOSA**

<b>PROJETO:</b> <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>		
NOME DA CAVIDADE: CAVERNA TUBERCULOSA	LOCAL: LAJEDO DO ROSÁRIO	MUNICÍPIO / UF: FELIPE GUERRA / RN
COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO: 648.980E, 9.385.346N / 81m / 0	DESENV. VERT. / PROJ. HORIZ. DA CAVIDADE: 119,7 m-DESCONTINUIDADE / 116,8 m	DESNÍVEL TOTAL: 5,8 m
MÉTODO DE MAPEAMENTO: BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	PRECISÃO: BCRA - 3C	LITOLOGIA: CALCÁRIO
TOLUJE TOPOGRAFIA: OSÉAS, KELFRANK, EDUARDO, ENCKEL, MAGNO, JORGE, KLEISON, LUIZ E RAFAEL	COORDENADOR DO PROJETO: CÉSAR U. V. VERÍSSIMO	
LAYOUT: JEFFERSON LIMA		DATA DO MAPEAMENTO: JANEIRO/2010



NÍVEL PRINCIPAL

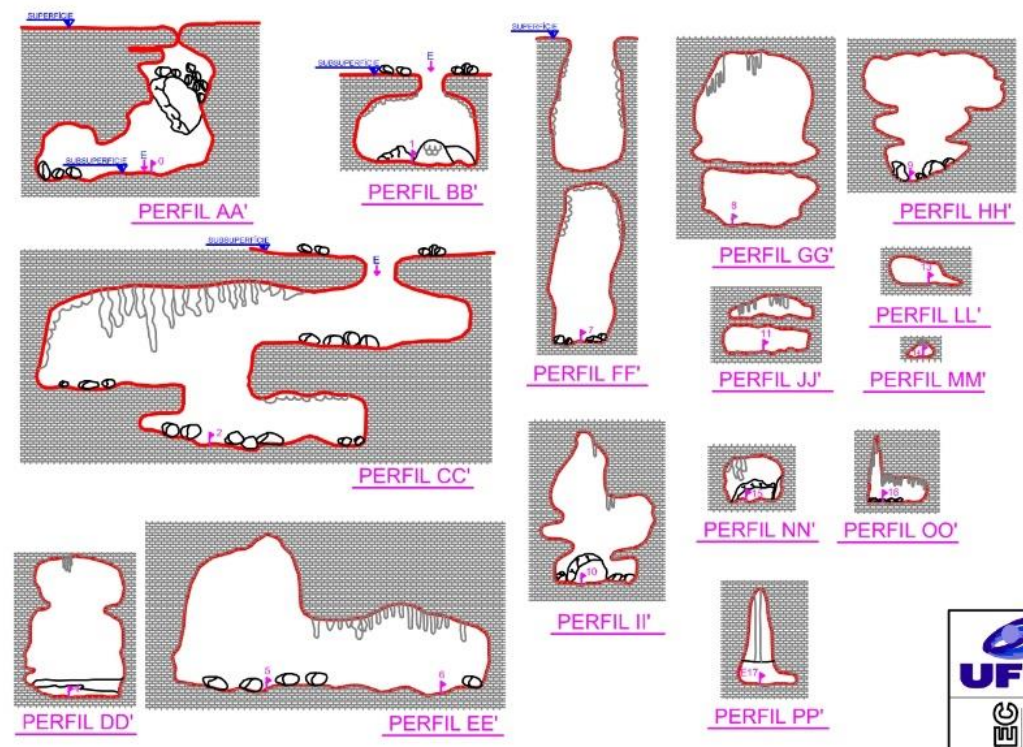
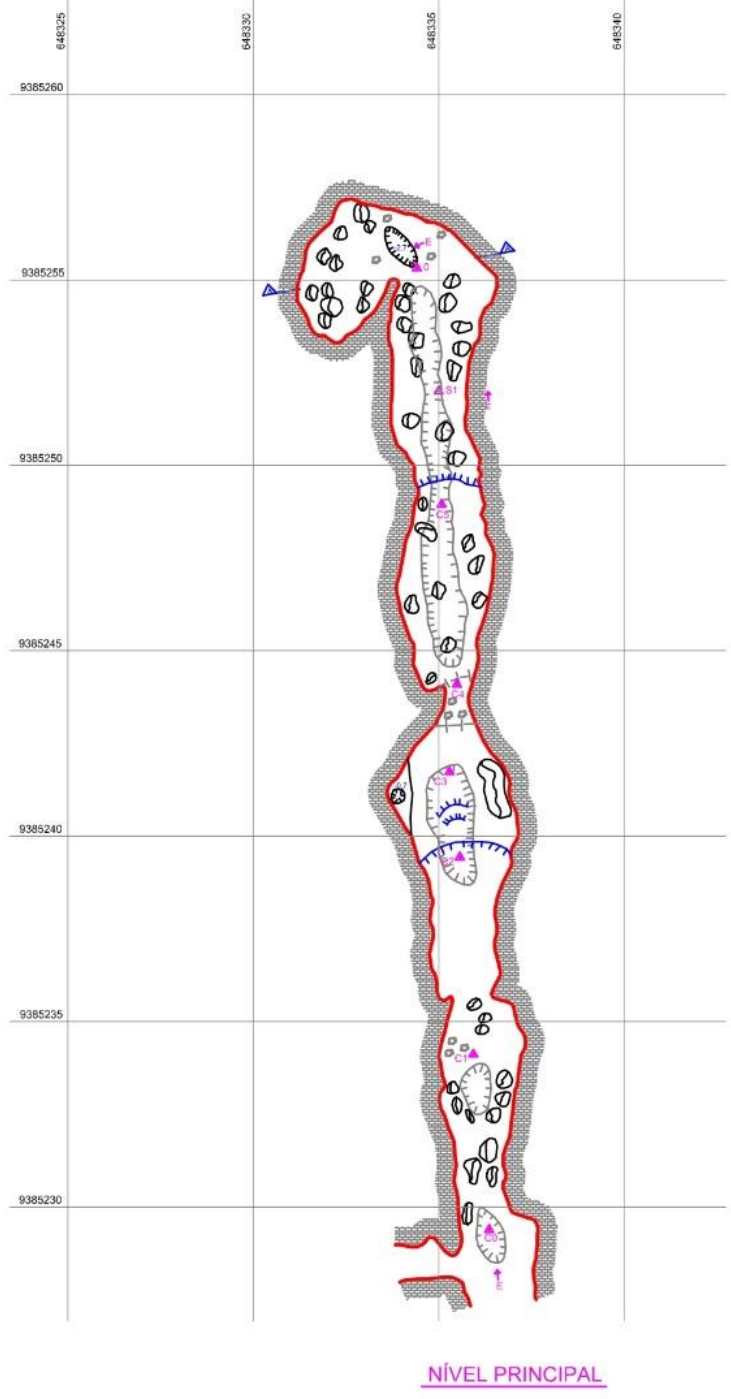
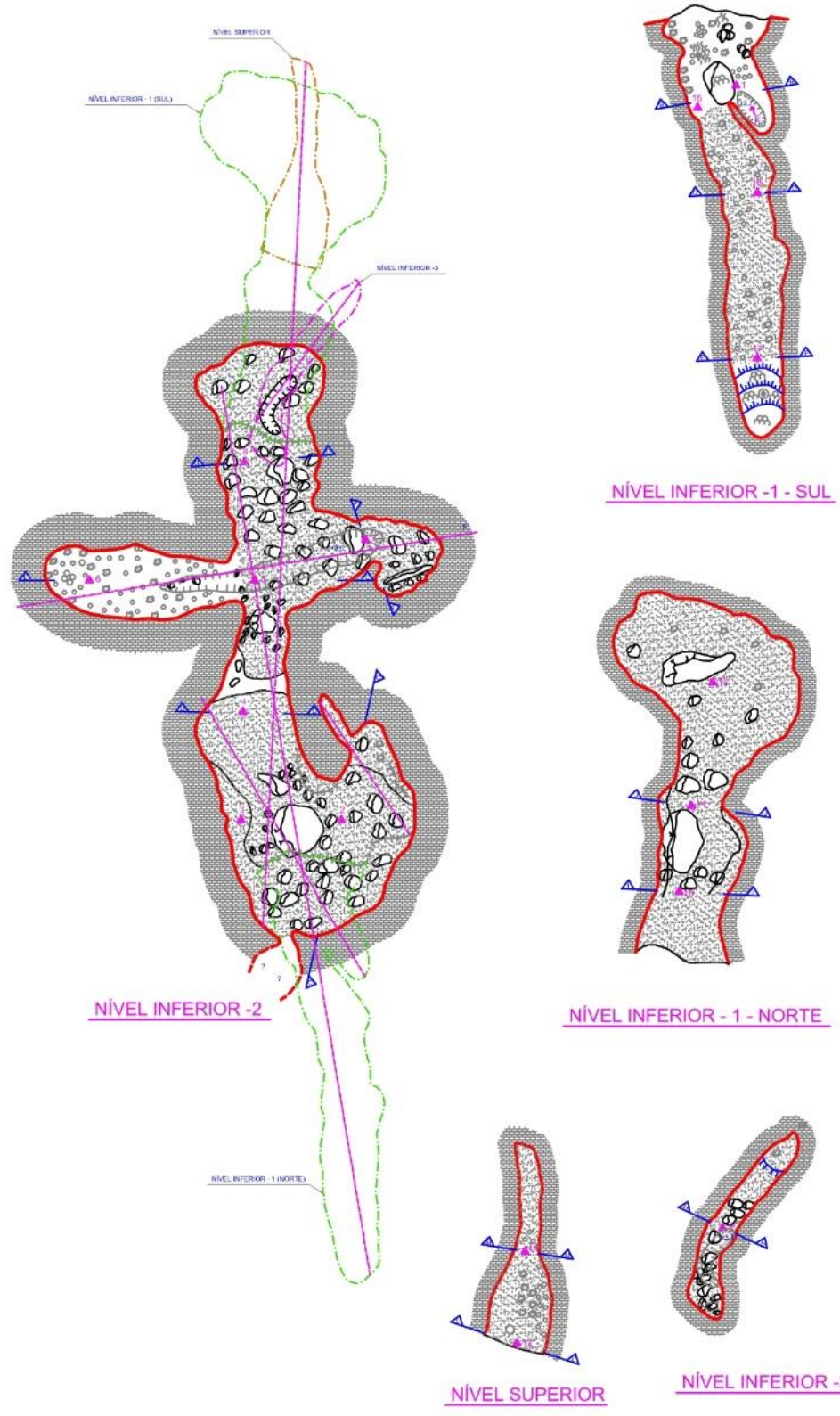


CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS

- BASE FIXA
- CONTOURNO DO NÍVEL PRINCIPAL (NÍVEL II)
- NÍVEL INFERIOR
- CONTOURNO DE CALIBRE ALTO TOPOGRÁFICO DE NEUTRO NÍVEL
- BLOCOS ESCALOS
- PEDREGAL ACORVADO
- ESTALACTITE
- CAUÇEDO
- ENTRADA DA CAVERNA
- PASSAGEM
- CÂMARA
- POÇO
- COBERTURA
- NATURAL IMPEDIDA OU INFERIDA
- COLUNA

NÍVEL INFERIOR

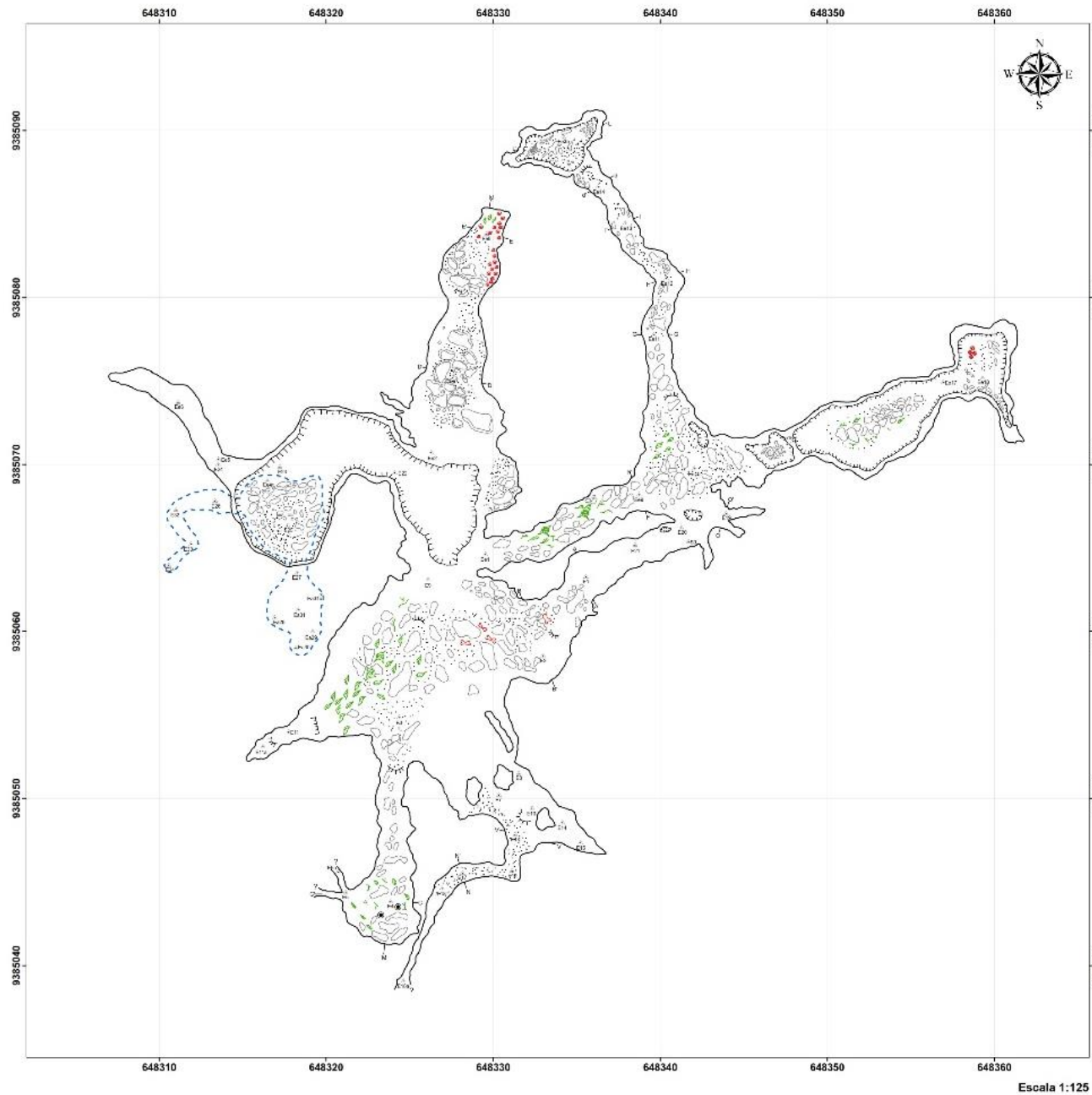
<b>PROJETO</b> <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>		
NOME DA CAVERNA: CAVERNA BOLINHA	LOCAL: LAJE DO ROSÁRIO	MUNICÍPIO / UF: FELIPE GUERRA / RN
COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO: 848 587E, 9.385 281N / 100m / S0	DESENH. VERT. MÉTODO / PROJ.:/ 137,2 m-DESCONTINUIDADE / 132,8 m	DESNÍVEL TOTAL: 8,4 m
MÉTODO DE Mapeamento: BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	PRECISÃO: BCRA - 3C	LITOLOGIA: CALCÁRIO
EQUIPE TOPOGRÁFICA: VANUSA CASTELO, FCO KLEISON, OSÉAS MARCAL, JEFFERSON LIMA, JEFFERSON REGIS, JORGE BRUNO, EL ENILZA GOMES, LUIZ HENRIQUE, RAFAEL SARAIVA.		
COORDENADOR DO PROJETO: CÉSAR U. V. VERÍSSIMO	LAYOUT: JEFFERSON LIMA	DATA DO Mapeamento: 10/01/2010



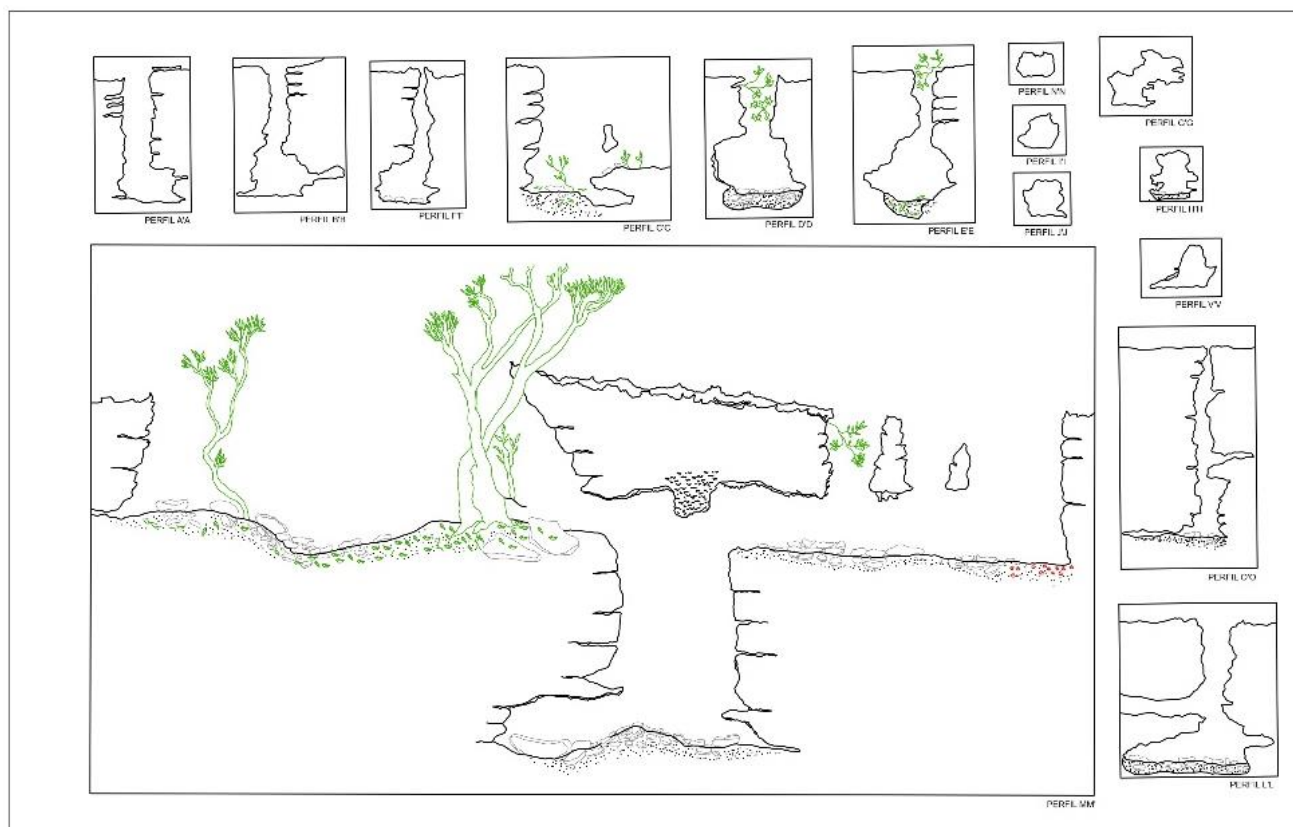
- CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**
- BASE FIXA
  - BASE TEMPORÁRIA
  - CONTOURO DA GALERIA TOPOGRÁFICA
  - CONDUITO NÃO TOPOGRÁFICO
  - CONTOURO DA PROJEÇÃO DA BORDA DA DOLINA
  - BLOCOS SOLTOS
  - NÍVEL AGUÇADO
  - CALCÁRIO
  - FRATURA Mapeada ou inferida
  - ENTRADA DA CAVERNA
  - ABÓRDA
  - ABÓRDA
  - CLARABÓIA
  - POÇO
  - TETO BAIXO
  - COIVITE FLOR
  - ESTALACTITE

<b>PROJETO</b>		
<b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>		
NOME DA CAVIDADE CAVERNA CHOICALHO	LOCAL LAJEDO DO ROSÁRIO	MUNICÍPIO / UF FELIPE GUERRA / RN
COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO 648.335E, 9.385.252N / 69m / S1	DESENH. VERT. / PROJ. HORIZ. DA CAVIDADE 20:1 m-DESCONTINUIDADE / 26,0 m	DESNÍVEL TOTAL 8,1 m
MÉTODO DE MAPEAMENTO BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	PRECISÃO BCRA - 3C	LITOLOGIA CALCÁRIO
EQUIPE TOPOGRÁFICA ALEXSANDRO GARCÉS, BRUNO FARIAS, ELENILZA GOMES, JEFFERSON LIMA, JEFFERSON REGIS E VANUSA CASTELO		
COORDENADOR DO PROJETO CÉSAR U. V. VERÍSSIMO	LAYOUT JEFFERSON LIMA	DATA DO MAPEAMENTO JANEIRO/2010

CAVERNA COMPLEXO SUÍÇO



DATUM : WGS-84  
PROJEÇÃO : UTM  
ZONA : 24S



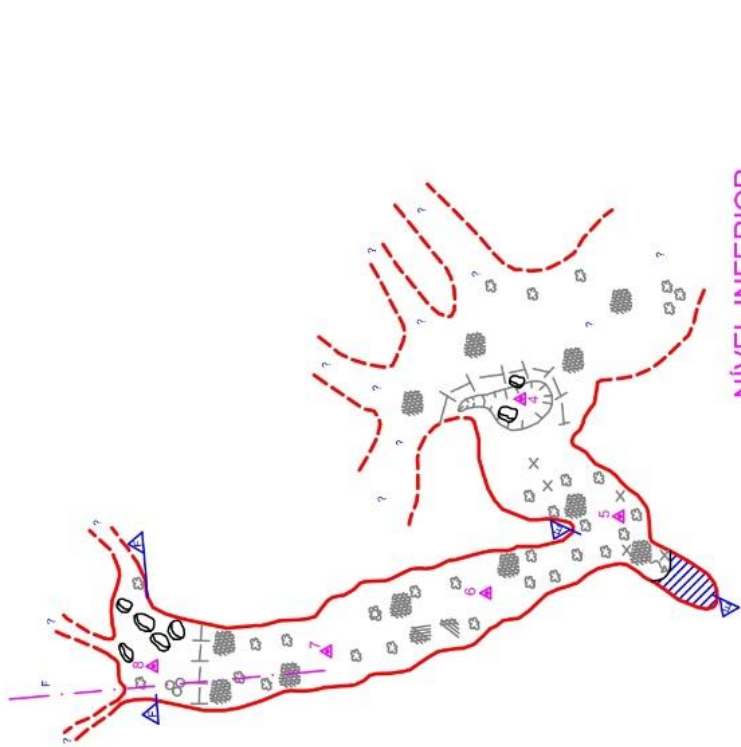
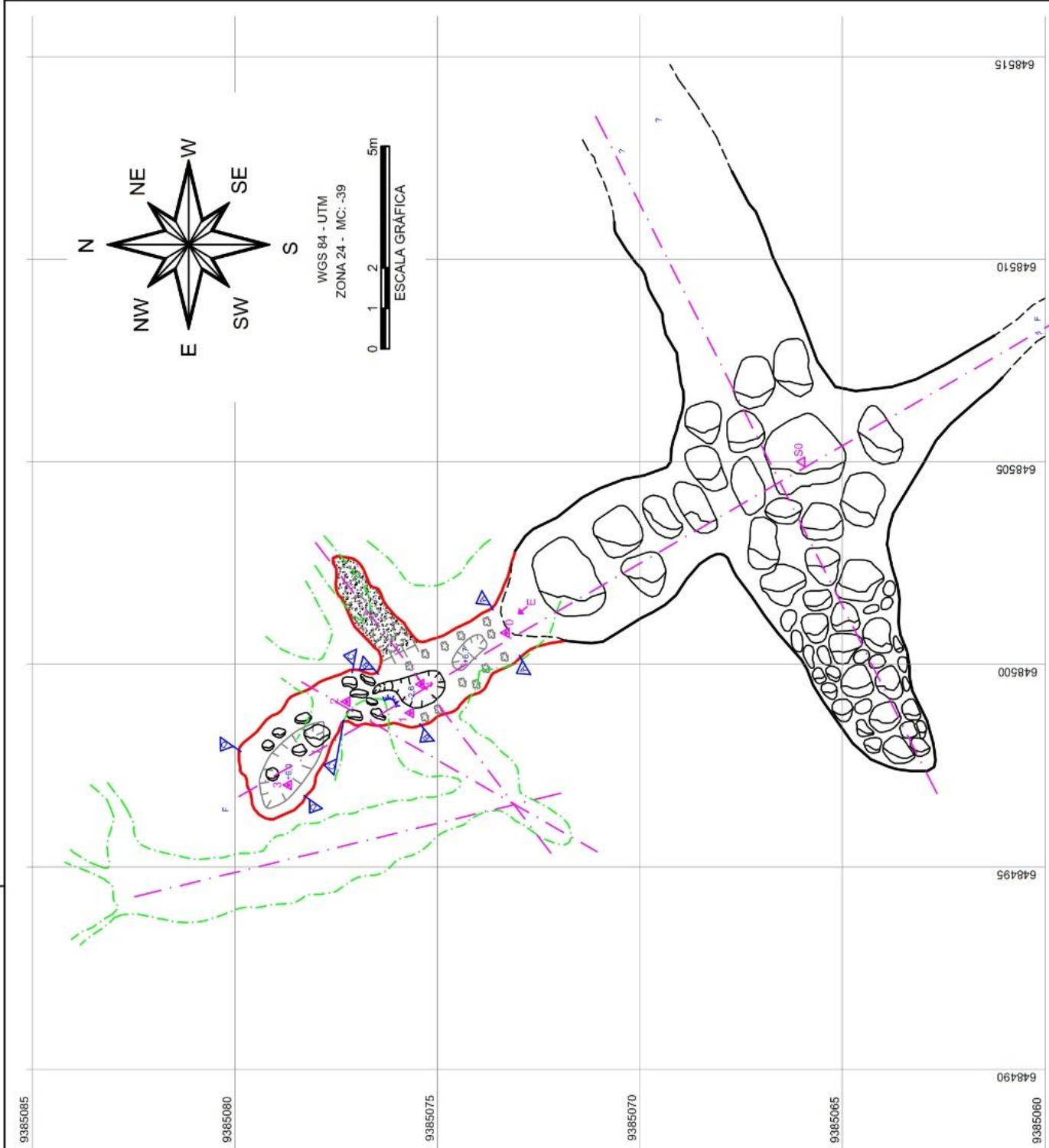
CONDIÇÕES ESPELEOMÉTRICAS

	BASE P/RA		VEGETAÇÃO		HORIZONTAL ROCK LAYER
	CONDIÇÃO PRINCIPAL DA CAVERNA		ESTALAGMITE		ESTALACTITE
	NÍVEL 1		BLOCOS DOLÔMITAS		ROCHA
	NÍVEL 2		AREIA		CORRIDA
	NÍVEL 3		COLUMAR		POZO COM INDICADOR PARA O NÍVEL SUPERIOR
	NÍVEL ALTO		COLUMAR		DESECO DO CONDUTO
	CONDIÇÃO PRINCIPAL DA CAVERNA		TRAVERTINO		

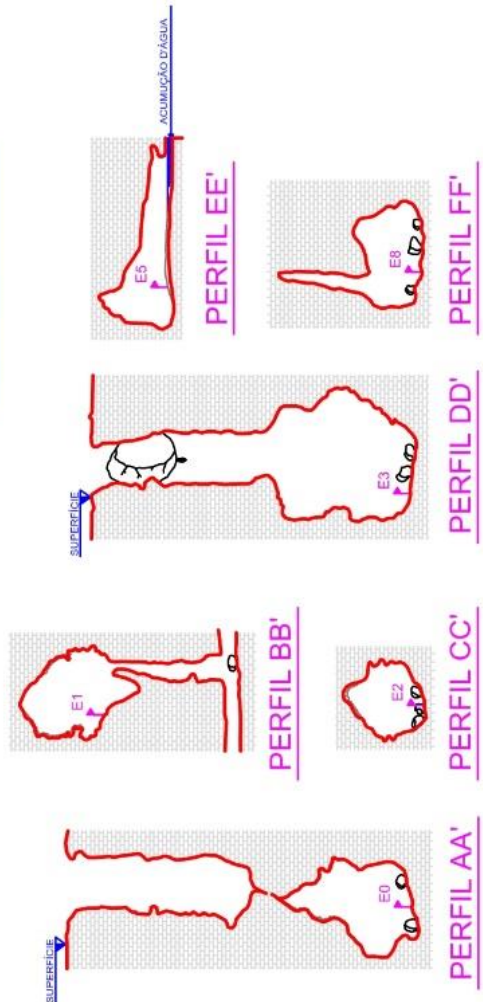
**UFC**

**PROJETO:**  
**ESPELOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA**

NOME DA CAVERNA: COMPLEXO SUÍÇO	LOCAL: LAJEDO DO ROSÁRIO	MUNICÍPIO / UF: FELIPE GUERRA / RN
COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO: 648.341°E, 9.385.066N / 75m / 0	DESENHO VERT. / PROJ. HORIZ. DA CAVERNA: 278.0 m / DESCONTINUIDADE / 273.0 m	DESNIVEL TOTAL: 14.4 m
NÍVEL DE MAQUETE NÍVEL: BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	PAISAGEM: BCRA - 3C	UTILIZAÇÃO: CALÇÁRIO
EQUIPE TOPOGRÁFICA: KELFRANK, ENCKEL, EDUARDO, CÉSAR VERISSIMO, BENTO E RAFAEL		
COORDENADOR DO PROJETO: CÉSAR U. V. VERISSIMO	LAYOUT: JEFFERSON LIMA	DATA DO MAPEAMENTO: JAN/FEB/2010



**NÍVEL INFERIOR**



**CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS**

- |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

**NÍVEL PRINCIPAL**

<b>PROJETO:</b> <b>ESPELEOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS CAVIDADES NATURAIS DE FELIPE GUERRA</b>	
<b>NOME DA CAVIDADE:</b> CAVERNA CORREDORES	<b>LOCAL:</b> LAJEDO DO ROSÁRIO
<b>COORDENADA / ALTITUDE / ESTAÇÃO:</b> 648.505E, 9.385.066N / 72 m / S0	<b>DESENV. VERT. / PROJ. HORIZ. DA CAVIDADE:</b> 30,4 m - DESCONTINUIDADE / 28,7 m
<b>METODO DE MAPEAMENTO:</b> BASE FLUTUANTE COM PÊNDULO	<b>PRECISÃO:</b> BCRA - 3C
<b>EQUIPE TOPOGRÁFICA:</b> JEFFERSON LIMA, VANUSA CASTELO, BRUNO FARIAS E ALEXSANDRO GARCÉS	
<b>COORDENADOR DO PROJETO:</b> CESAR U. V. VERISSIMO	<b>LAYOUT:</b> JEFFERSON LIMA
<b>MUNICÍPIO / UF:</b> FELIPE GUERRA / RN	
<b>DESNIVEL TOTAL:</b> 5,6 m	
<b>LITOLOGIA:</b> CALCÁRIO	
<b>DATA DO MAPEAMENTO:</b> JANEIRO/2010	

**Anexo 2 – Resultados detalhados dos ensaios**

## ENSAIO DE ÍNDICES FÍSICOS

AMOSTRA S1						
EXEMPLAR	PESO SECO	PESO SATURADO	PESO SUBMERSO	DENSIDADE APARENTE kg/m <sup>3</sup>	POROSIDADE %	ABSORÇÃO %
1	259.22	274.45	159.31	2251.35	13.23	5.88
2	301.54	313.80	187.29	2383.53	9.69	4.07
3	296.30	310.38	183.50	2335.28	11.10	4.75
4	252.28	269.90	154.81	2192.02	15.31	6.98
5	289.76	304.78	179.09	2305.35	11.95	5.18
6	290.79	303.99	179.38	2333.60	10.59	4.54
7	277.31	289.70	171.60	2348.09	10.49	4.47
8	271.15	285.58	167.23	2291.09	12.19	5.32
9	266.51	279.60	164.69	2319.29	11.39	4.91
10	263.20	280.20	161.64	2219.97	14.34	6.46
			<b>Média</b>	<b>2297.96</b>	<b>12.03</b>	<b>5.26</b>
			<b>Desvio Padrão</b>	<b>60.12</b>	<b>1.79</b>	<b>0.93</b>
			<b>Coef. De Var.</b>	<b>0.03</b>	<b>0.15</b>	<b>0.18</b>
AMOSTRA S2						
EXEMPLAR	PESO SECO	PESO SATURADO	PESO SUBMERSO	DENSIDADE APARENTE kg/m <sup>3</sup>	POROSIDADE %	ABSORÇÃO %
1	279.06	294.46	172.79	2293.58	12.66	5.52
2	278.65	291.50	173.35	2358.44	10.88	4.61
3	276.61	290.68	171.64	2323.67	11.82	5.09
4	277.93	291.48	172.53	2336.53	11.39	4.88
5	293.11	305.28	182.63	2389.81	9.92	4.15
6	279.04	294.22	173.11	2304.02	12.53	5.44
7	276.31	291.51	171.21	2296.84	12.64	5.50
8	279.1	293.66	173.24	2317.72	12.09	5.22
9	276.64	288.99	171.79	2360.41	10.54	4.46
10	280.28	292.98	174.42	2364.04	10.71	4.53
			<b>Média</b>	<b>2334.51</b>	<b>11.52</b>	<b>4.94</b>
			<b>Desvio Padrão</b>	<b>32.66</b>	<b>0.98</b>	<b>0.49</b>
			<b>Coef. De Var.</b>	<b>0.01</b>	<b>0.08</b>	<b>0.10</b>
AMOSTRA S3						
EXEMPLAR	PESO SECO	PESO SATURADO	PESO SUBMERSO	DENSIDADE APARENTE kg/m <sup>3</sup>	POROSIDADE %	ABSORÇÃO %
1	290.16	309.46	180.47	2249.48	14.96	6.65
2	281.32	300.71	174.71	2232.70	15.39	6.89
3	288.00	307.43	178.85	2239.85	15.11	6.75
4	292.58	310.54	181.82	2273.00	13.95	6.14
5	282.67	300.00	175.72	2274.46	13.94	6.13
6	295.24	312.26	183.64	2295.44	13.23	5.76
7	282.18	301.15	175.09	2238.46	15.05	6.72
8	287.50	305.29	178.61	2269.50	14.04	6.19
9	290.35	308.65	180.46	2265.00	14.28	6.30
10	277.99	295.33	172.61	2265.24	14.13	6.24
			<b>Média</b>	<b>2260.31</b>	<b>14.41</b>	<b>6.38</b>
			<b>Desvio Padrão</b>	<b>19.73</b>	<b>0.68</b>	<b>0.36</b>
			<b>Coef. De Var.</b>	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>



## ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

AMOSTRA S1					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	68.9	69.0	69.5	4791.1	30.6
2	68.9	68.5	68.8	4742.0	29.9
3	68.7	69.3	69.3	4758.3	29.1
4	69.0	69.3	69.5	4791.2	40.6
5	68.8	69.2	69.0	4747.2	47.0
				<b>Média</b>	35.5
				<b>Desvio Padrão</b>	7.99
				<b>Coef. Variação</b>	0.23
AMOSTRA S2					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	70.8	70.6	70.7	5002.0	45.7
2	70.6	71.0	70.8	4995.8	48.8
3	70.7	70.9	71.3	5040.9	40.0
4	71.0	70.7	71.5	5076.5	38.7
5	70.8	70.7	71.0	5028.6	49.0
				<b>Média</b>	44.5
				<b>Desvio Padrão</b>	4.85
				<b>Coef. Variação</b>	0.11
AMOSTRA S3					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	70.2	71.4	70.8	4966.6	39.1
2	71.2	70.2	70.7	5026.7	34.8
3	70.6	70.0	70.9	5003.8	40.9
4	69.9	71.2	71.1	4968.1	38.0
5	70.3	70.6	71.3	5008.0	36.0
				<b>Média</b>	37.8
				<b>Desvio Padrão</b>	2.46
				<b>Coef. Variação</b>	0.07
AMOSTRA I1					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	67.0	66.8	68.2	4570.2	42.5
2	69.7	70.3	68.2	4754.4	41.2
3	68.7	70.7	69.8	4798.7	32.9
4	67.7	69.2	67.1	4540.1	38.2
5	69.2	69.9	69.3	4791.2	44.4
				<b>Média</b>	39.8
				<b>Desvio Padrão</b>	4.49
				<b>Coef. Variação</b>	0.11

AMOSTRA I2					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	68.2	67.7	69.1	4710.9	22.2
2	68.7	67.9	67.4	4627.0	23.8
3	68.3	68.6	67.6	4616.2	25.7
4	67.5	68.8	67.0	4524.2	31.5
5	69.1	68.8	69.3	4786.0	25.2
				<b>Média</b>	25.7
				<b>Desvio Padrão</b>	3.56
				<b>Coef. Variação</b>	0.14
AMOSTRA I3					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	68.7	68.9	68.6	4711.1	51.2
2	67.8	68.4	68.2	4622.3	47.2
3	68.4	69.3	69.2	4730.7	35.5
4	68.2	68.5	67.3	4589.0	49.9
5	69.4	68.4	69.1	4794.7	27.6
				<b>Média</b>	42.3
				<b>Desvio Padrão</b>	10.28
				<b>Coef. Variação</b>	0.24
AMOSTRA D3					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	68.3	68.6	69.0	4707.5	62.0
2	68.7	68.3	68.8	4728.3	39.1
3	70.8	70.4	69.4	4908.2	61.4
4	68.8	69.0	69.6	4788.5	41.9
5	67.9	68.4	69.2	4695.2	86.0
				<b>Média</b>	58.1
				<b>Desvio Padrão</b>	18.90
				<b>Coef. Variação</b>	0.33
AMOSTRA D4					
Exemplar	Dimensões Media			Área (m <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)
	A(mm)	B(mm)	C(mm)		
1	68.3	68.8	68.8	4693.9	162.5
2	67.6	68.5	68.5	4623.8	41.5
3	68.6	68.7	69.8	4787.4	79.5
4	69.3	69.2	69.0	4780.8	43.3
5	69.5	69.8	69.7	4846.8	67.9
				<b>Média</b>	79.0
				<b>Desvio Padrão</b>	49.44
				<b>Coef. Variação</b>	0.63

## ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO

AMOSTRA S1			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	5.02	5.115	5.08
	5.17		
	5.19		
	5.08		
2	4.95	5.045	
	5.17		
	5.1		
	4.96		

AMOSTRA S2			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	4.94	5.06	5.95
	4.96		
	5.18		
	5.17		
2	6.54	6.84	
	7.15		
	7.18		
	6.48		

AMOSTRA S3			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	7.01	6.36	6.42
	6.27		
	5.25		
	6.90		
2	6.59	6.48	
	5.85		
	6.34		
	7.15		

AMOSTRA I1			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	4.23	4.01	4.07
	4.24		
	3.77		
	3.80		
2	3.86	4.12	
	3.60		
	4.29		
	4.74		

AMOSTRA I2			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	4.62	4.42	5.01
	3.68		
	4.23		
	5.14		
2	5.96	5.60	
	5.69		
	5.26		
	5.49		

AMOSTRA I3			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	5.82	5.54	4.77
	5.21		
	5.25		
	5.87		
2	4.73	4.00	
	3.87		
	3.33		
	4.06		

AMOSTRA D3			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	1.95	1.76	1.76
	2.34		
	1.61		
	1.15		
2	2.65	1.76	
	1.90		
	0.98		
	1.49		

AMOSTRA D4			
Exemplar	Desgaste em 500 m		
	Individual (mm)	Média	M.Geral (mm)
1	1.02	1.66	1.59
	1.79		
	2.38		
	1.43		
2	1.37	1.52	
	0.30		
	1.94		
	2.48		

**ENSAIO DE ATAQUE QUÍMICO**

<b>Amostras</b>	<b>Peso Inicial (g)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Perda de Massa</b>
<b>S1</b>	25.38	13.75	45.82%
<b>S2</b>	26.24	12.86	50.98%
<b>S3</b>	24.50	13.57	44.63%
<b>I1</b>	24.89	12.04	51.64%
<b>I2</b>	25.08	13.09	47.79%
<b>I3</b>	28.16	14.41	48.82%
<b>D3</b>	27.18	16.28	40.10%
<b>D4</b>	31.91	19.39	39.24%

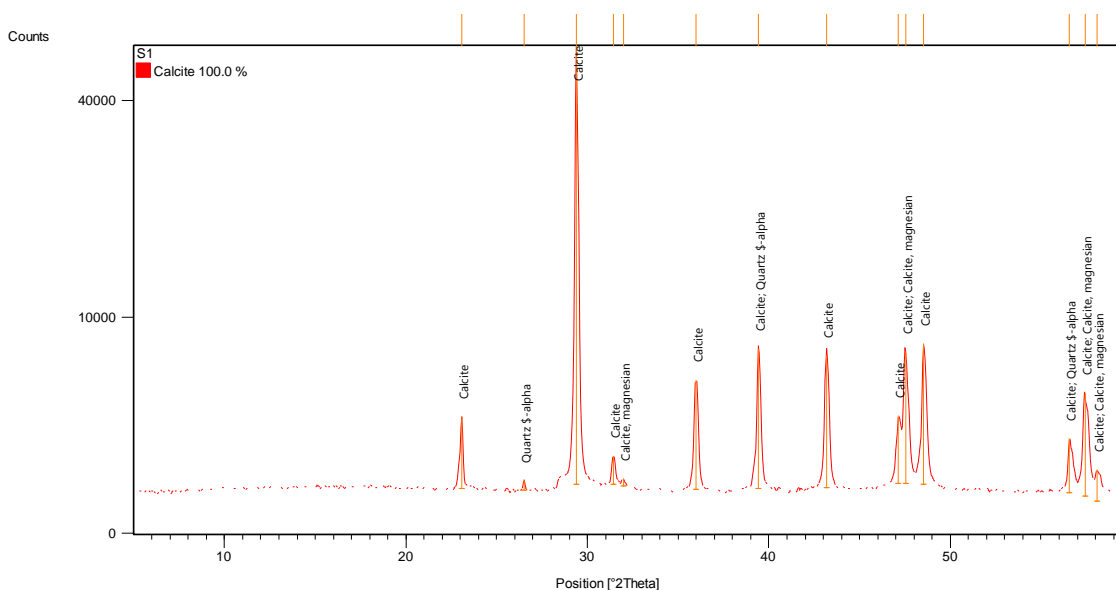
**Anexo 3 – Resultados detalhados das difratometrias de raios-x**

**AMOSTRA S1**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	S1
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\S1.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffraction system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	5.0111
End Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	151.8612
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}$ 2Th.]	2.12
Offset [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}$ C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
23.0544	2480.65	0.1476	3.85790	4.92
26.5042	214.20	0.1476	3.36307	0.43
29.4122	50391.01	0.1968	3.03685	100.00
31.4384	771.00	0.1476	2.84560	1.53
31.9737	175.07	0.1476	2.79917	0.35
35.9984	4650.23	0.1968	2.49491	9.23
39.4371	6851.96	0.1968	2.28493	13.60
43.1930	6316.72	0.1968	2.09455	12.54
47.1311	2439.07	0.1476	1.92832	4.84
47.5391	6566.28	0.1968	1.91272	13.03
48.5314	7211.13	0.2460	1.87590	14.31
56.5791	1593.37	0.2460	1.62670	3.16
57.4194	3970.53	0.2952	1.60487	7.88
58.1069	642.42	0.3600	1.58620	1.27

## Pattern List: (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-0577	70	Calcite	0.000	0.980	Ca ( C O3 )
*	01-071-1663	55	Calcite, magnesian	0.000	0.016	Mg0.1 Ca0.9 C O3
*	01-089-8938	23	Quartz \$- alpha	0.000	0.005	Si O2

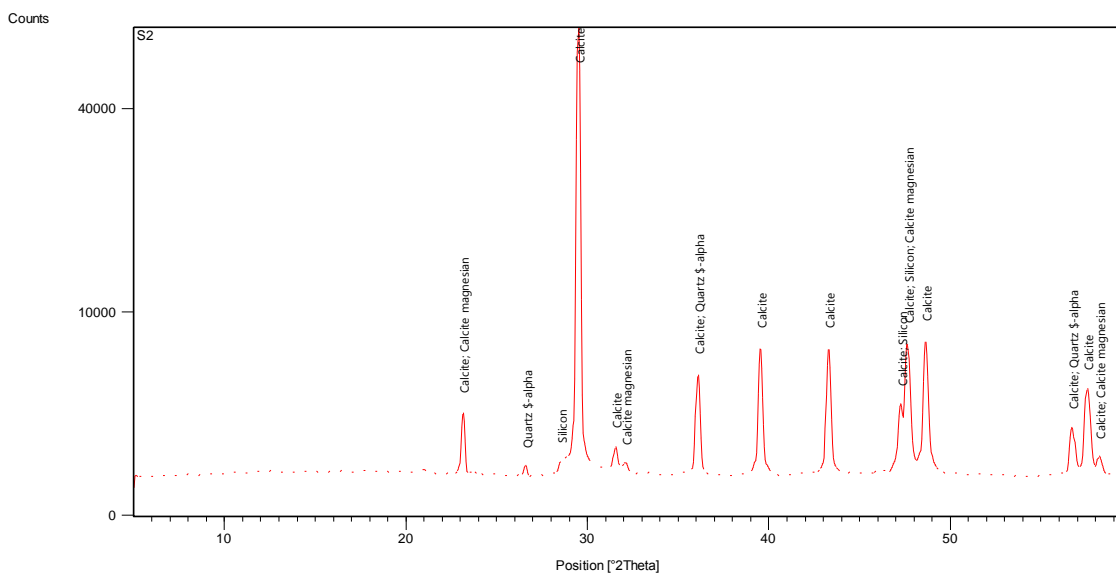
**AMOSTRA S2**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	S2
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\S2.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffraction system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	5.0111
End Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	79.8987
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}$ 2Th.]	2.12
Offset [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}$ C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes



## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
23.1436	2233.96	0.1968	3.84323	3.76
26.5849	213.80	0.1968	3.35304	0.36
28.5259	253.98	0.1968	3.12916	0.43
29.5030	59360.36	0.1968	3.02771	100.00
31.5411	652.87	0.1968	2.83656	1.10
32.0709	205.12	0.1968	2.79090	0.35
36.0867	4594.89	0.1968	2.48901	7.74
39.5300	6604.90	0.1968	2.27978	11.13
43.2814	6588.57	0.1968	2.09048	11.10
47.2502	2538.03	0.1476	1.92373	4.28
47.6328	6830.78	0.2460	1.90917	11.51
48.6354	7115.03	0.2460	1.87213	11.99
56.7083	1440.65	0.2460	1.62330	2.43
57.5422	3528.42	0.2460	1.60174	5.94
58.1968	423.88	0.2400	1.58396	0.71

## Pattern List: (Bookmark 4)

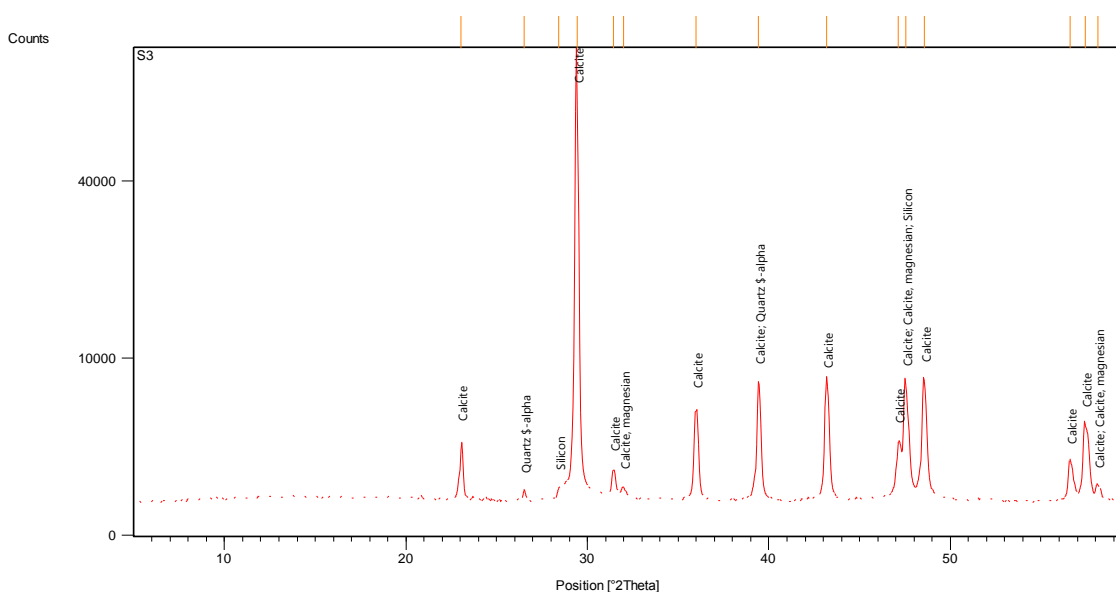
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-072-1652	63	Calcite	0.000	0.929	Ca C O3
*	01-089-8938	17	Quartz \$-alpha	0.000	0.002	Si O2
*	01-077-2109	0	Silicon	0.000	0.013	Si
*	01-086-2336	30	Calcite magnesian	0.000	0.024	( Mg.129 Ca.871 ) ( C O3 )

**AMOSTRA S3**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	S3
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\S3.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffraction system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	5.0111
End Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	151.8612
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}$ 2Th.]	2.12
Offset [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}$ C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
23.0514	2605.09	0.1476	3.85840	3.23
26.5238	242.24	0.1476	3.36063	0.30
28.4299	264.39	0.1968	3.13950	0.33
29.4153	80760.69	0.1476	3.03653	100.00
31.4508	887.28	0.1968	2.84450	1.10
31.9787	262.10	0.1476	2.79874	0.32
35.9998	4990.55	0.1968	2.49482	6.18
39.4446	7151.58	0.1968	2.28452	8.86
43.2004	6753.85	0.1968	2.09421	8.36
47.1261	2313.91	0.1476	1.92851	2.87
47.5443	6848.58	0.2460	1.91252	8.48
48.5496	7212.86	0.2460	1.87524	8.93
56.6236	1308.55	0.2952	1.62552	1.62
57.4566	3445.47	0.2952	1.60393	4.27
58.1272	349.28	0.3000	1.58570	0.43

## Pattern List: (Bookmark 4)

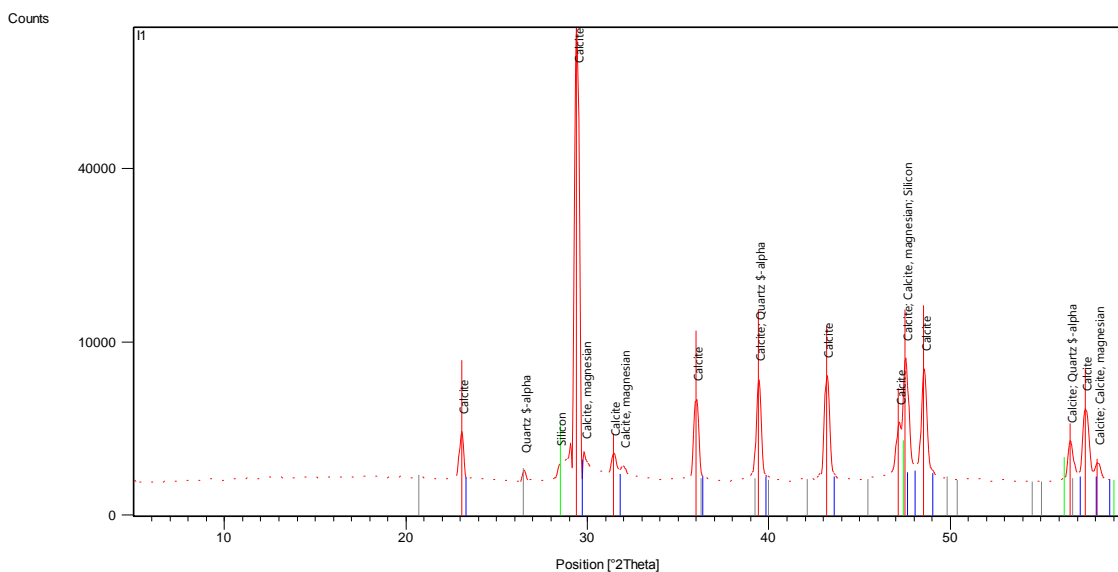
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-2334	85	Calcite	0.000	0.945	Ca ( C O <sub>3</sub> )
*	01-089-8937	40	Quartz \$- alpha	0.000	0.005	Si O <sub>2</sub>
*	01-071-1663	30	Calcite, magnesian	0.000	0.010	Mg <sub>0.1</sub> Ca <sub>0.9</sub> C O <sub>3</sub>
*	01-077-2109	0	Silicon	0.000	0.021	Si

**AMOSTRA I1**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	I1
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\I1.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffractometer system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Measurement Date / Time	6/25/2014 7:48:04 PM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0111
End Position [°2Th.]	59.9111
Step Size [°2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	151.8612
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2Th.]	2.12
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
23.0583	1867.81	0.1968	3.85726	2.35
26.5097	280.55	0.1968	3.36238	0.35
28.4736	381.89	0.2460	3.13478	0.48
29.4224	79353.55	0.2460	3.03582	100.00
29.8645	541.24	0.0984	2.99188	0.68
31.4539	668.67	0.1968	2.84422	0.84
31.9694	283.28	0.1968	2.79954	0.36
35.9982	4063.35	0.2460	2.49493	5.12
39.4420	5768.77	0.2460	2.28466	7.27
43.1992	6095.66	0.2460	2.09427	7.68
47.1698	2277.33	0.1476	1.92683	2.87
47.5472	7654.97	0.1968	1.91241	9.65
48.5492	6620.29	0.2952	1.87525	8.34
56.6221	1368.24	0.2460	1.62556	1.72
57.4578	3296.84	0.2952	1.60389	4.15
58.1222	460.59	0.3000	1.58582	0.58

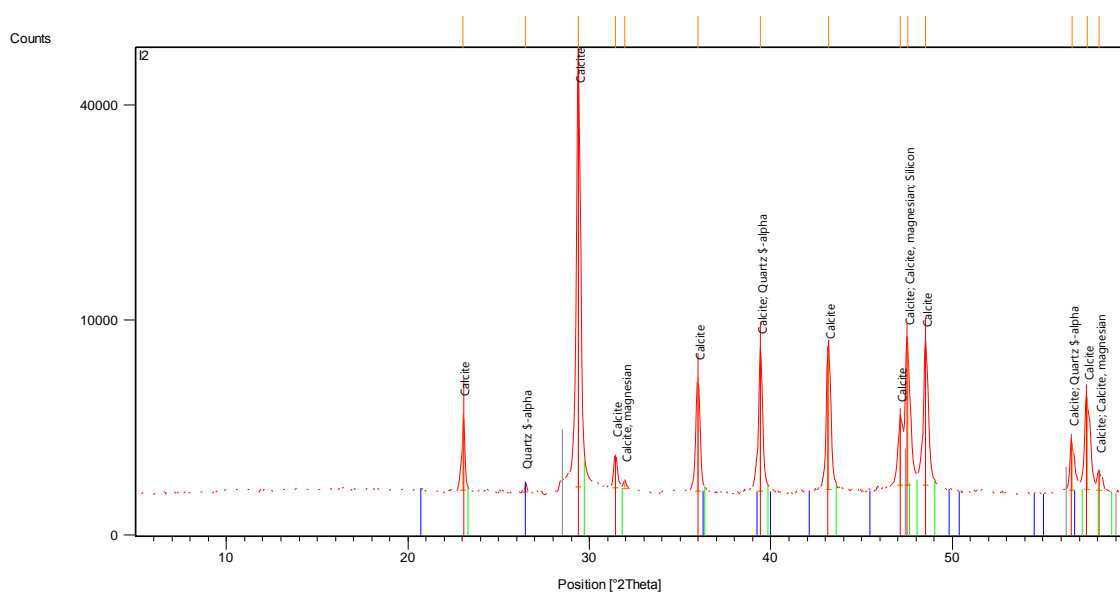
## Pattern List: (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-2334	73	Calcite	0.000	0.927	Ca ( C O3 )
*	01-071-1663	24	Calcite, magnesian	0.000	0.005	Mg0.1 Ca0.9 C O3
*	01-077-2109	0	Silicon	0.000	0.028	Si
*	01-089-8938	21	Quartz \$- alpha	0.000	0.004	Si O2

**AMOSTRA I2****Measurement Conditions: (Bookmark 1)**

Dataset Name	I2
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\I2.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size
2Theta:0.001; Minimum step size	Omega:0.001
size Phi:0.1	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step
	Diffraction system=XPRT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation
date=4/2/2007 11:10:47 AM	
Measurement Date / Time	6/25/2014 8:12:52 PM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	5.0111
End Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	151.8612
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}$ 2Th.]	2.12
Offset [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}$ C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
23.0452	2776.00	0.1476	3.85942	5.03
26.4737	122.41	0.2952	3.36687	0.22
29.4050	55211.61	0.1476	3.03757	100.00
31.4396	921.55	0.1476	2.84549	1.67
31.9536	205.59	0.1476	2.80088	0.37
35.9853	4938.83	0.1968	2.49579	8.95
39.4281	6896.91	0.1476	2.28544	12.49
43.1851	6456.95	0.1476	2.09491	11.69
47.1526	2348.50	0.1476	1.92749	4.25
47.5310	7474.57	0.1968	1.91302	13.54
48.5304	7319.85	0.1968	1.87594	13.26
56.5974	1399.16	0.2460	1.62622	2.53
57.4316	3635.17	0.2952	1.60456	6.58
58.0722	475.86	0.2400	1.58707	0.86

## Pattern List: (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-1762	94	Calcite	0.000	0.988	Ca ( C O3 )
*	01-089-8938	31	Quartz $\alpha$	0.000	0.005	Si O2
*	01-071-1663	30	Calcite, magnesium	0.000	0.014	Mg0.1 Ca0.9 C O3
*	01-077-2109	0	Silicon	0.000	0.039	Si

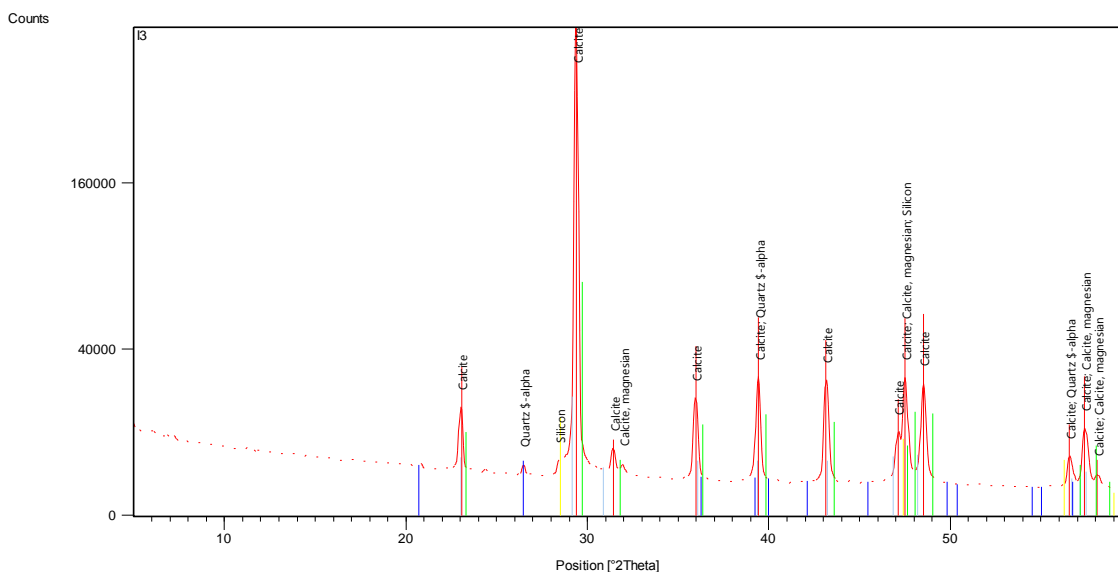
**AMOSTRA I3**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	I3
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\I3.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffraction system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}2\theta$ .]	5.0111
End Position [ $^{\circ}2\theta$ .]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}2\theta$ .]	0.0500
Scan Step Time [s]	152.8606
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}2\theta$ .]	2.12
Offset [ $^{\circ}2\theta$ .]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [ $^{\circ}$ ]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}C$ ]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes



## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
23.0217	13737.37	0.1968	3.86331	3.91
26.4741	1243.85	0.1476	3.36682	0.35
28.4234	1314.31	0.1968	3.14020	0.37
29.3832	351720.60	0.2460	3.03978	100.00
31.4151	3473.90	0.1968	2.84765	0.99
31.9499	1137.25	0.1968	2.80119	0.32
35.9595	17734.13	0.1968	2.49752	5.04
39.4021	25564.47	0.1968	2.28688	7.27
43.1550	24326.99	0.1968	2.09631	6.92
47.0963	7407.02	0.1476	1.92966	2.11
47.5106	24628.52	0.2460	1.91380	7.00
48.4997	22619.70	0.2460	1.87705	6.43
56.5604	3484.58	0.2952	1.62719	0.99
57.4014	9162.93	0.2460	1.60534	2.61
58.1037	991.80	0.3000	1.58628	0.28

## Pattern List: (Bookmark 4)

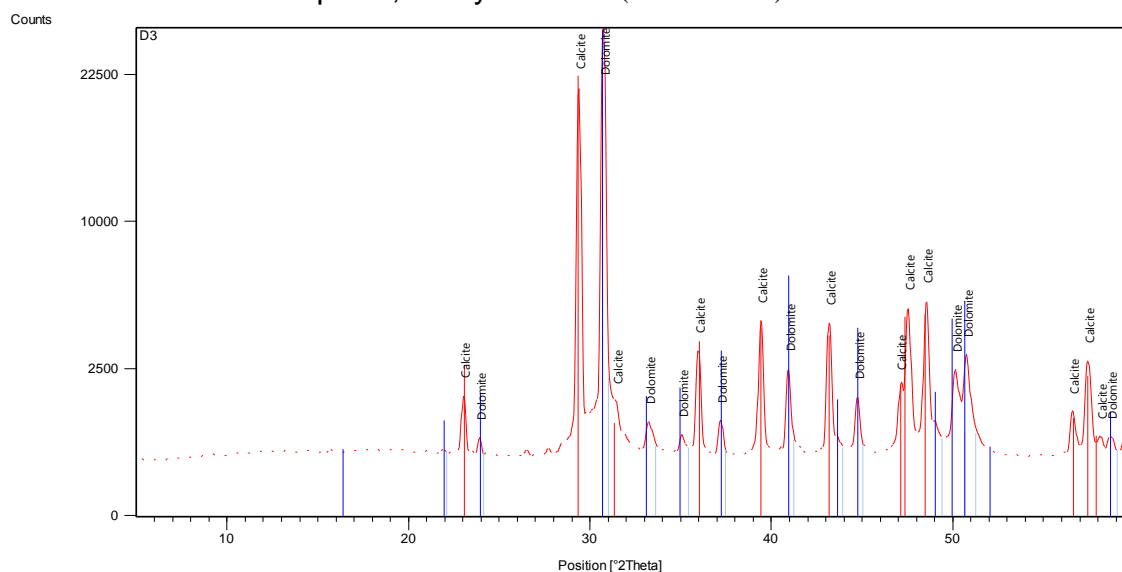
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-1762	63	Calcite	0.000	0.799	Ca ( C O3 )
*	01-089-8938	8	Quartz \$-alpha	0.000	0.005	Si O2
*	01-071-1663	1	Calcite, magnesian	0.000	0.201	Mg0.1 Ca0.9 C O3
*	01-077-2109	0	Silicon	0.000	0.028	Si

**AMOSTRA D3**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	D3
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\D3.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffraction system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	5.0111
End Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	152.8606
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}$ 2Th.]	2.12
Offset [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}$ C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23.0329	1222.84	0.2460	3.86145	4.45
23.9132	267.35	0.1968	3.72126	0.97
29.3936	20739.48	0.2460	3.03873	75.53
30.7399	27460.32	0.2460	2.90864	100.00
31.4380	907.58	0.1476	2.84563	3.31
33.2413	503.94	0.2952	2.69526	1.84
35.0666	271.41	0.1968	2.55904	0.99
35.9775	2671.39	0.2460	2.49631	9.73
37.2067	614.25	0.1968	2.41662	2.24
39.4231	3946.47	0.2460	2.28572	14.37
40.9353	2013.58	0.2460	2.20470	7.33
43.1810	3812.35	0.2460	2.09511	13.88
44.7396	1123.86	0.2460	2.02568	4.09
47.0916	1324.93	0.1476	1.92984	4.82
47.5385	4415.47	0.2460	1.91274	16.08
48.5372	4689.27	0.2460	1.87569	17.08
50.1428	1827.22	0.2460	1.81933	6.65
50.7547	2394.19	0.2460	1.79882	8.72
56.6094	796.89	0.2952	1.62590	2.90
57.4495	2274.74	0.2952	1.60410	8.28
58.1222	225.12	0.1968	1.58713	0.82
58.6853	228.44	0.3600	1.57194	0.83

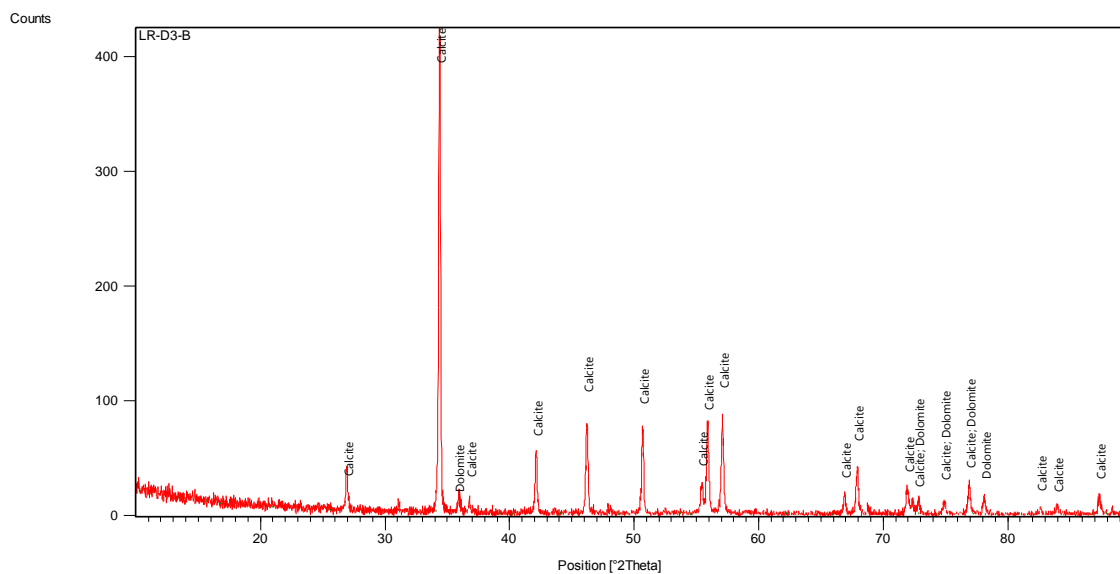
## Pattern List: (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-2339	72	Calcite	0.000	0.743	Ca ( C O3 )
*	01-073-2444	35	Dolomite	0.000	0.909	Ca Mg ( C O3 ) <sub>2</sub>

**AMOSTRA D3 (PORÇÃO ESPONJOSA)****Measurement Conditions: (Bookmark 1)**

Dataset Name	LR-D3-B
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\RX\LR-D3-B.xrdml
Sample Identification	283
Comment	As medidas foran feitas com a fenda de 1/4 Configuration=SpinHybr, Owner=User-1, Creation date=2/13/2009
12:37:07 PM	
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size
2Theta:0.001; Minimum step size	Omega:0.001
	Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60;
Minimum step size Phi:0.1	
	Diffractometer system=XPERT-PRO
	Measurement program=Program1, Owner=User-1, Creation
date=2/16/2009 4:29:48 PM	
Operator	Administrator
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	10.0036
End Position [°2Th.]	89.9926
Step Size [°2Th.]	0.0130
Scan Step Time [s]	79.5176
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2Th.]	3.35
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Co
K-Alpha1 [Å]	1.78901
Generator Settings	40 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	Yes
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
26.9333	15.54	0.6649	3.84107	3.29
34.3834	471.71	0.1481	3.02638	100.00
35.8485	0.00	0.0125	2.90651	0.00
36.7890	14.46	0.0771	2.83468	3.06
42.1337	52.77	0.1829	2.48849	11.19
46.2137	90.61	0.1697	2.27930	19.21
50.6882	80.65	0.1602	2.08970	17.10
55.4378	25.13	0.2189	1.92311	5.33
55.9043	74.68	0.2061	1.90834	15.83
57.0969	93.46	0.1833	1.87173	19.81
66.8994	15.92	0.1705	1.62282	3.37
67.9185	46.86	0.1592	1.60133	9.93
71.9520	20.96	0.2739	1.52270	4.44
72.7952	7.75	0.5621	1.50746	1.64
74.9226	13.91	0.1506	1.47068	2.95
76.9078	24.36	0.2266	1.43838	5.16
78.1065	16.30	0.1977	1.41975	3.46
82.6342	6.35	0.2631	1.35485	1.35
83.9606	4.30	0.8465	1.33733	0.91
87.3651	14.84	0.2127	1.29514	3.15

## Pattern List: (Bookmark 4)

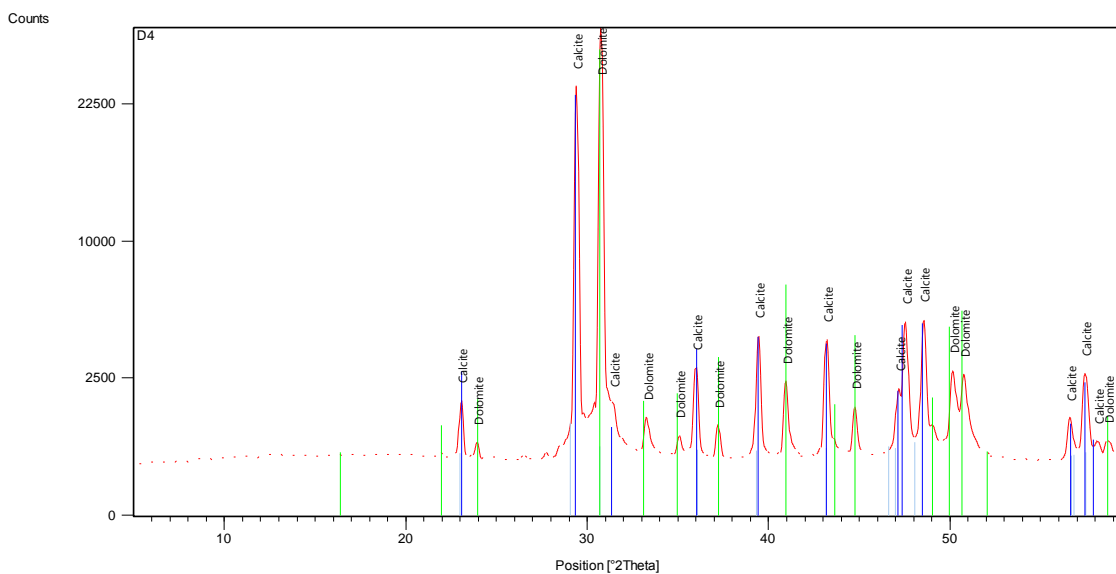
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [ $^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-072-1651	56	Calcite	0.000	0.933	Ca C O3
*	01-073-2409	6	Dolomite	0.000	0.044	Ca Mg ( C O3 )2

**AMOSTRA D4**

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	D4
File name	Z:\1.Jeff\#LepLop (backup)\1.Jefferson\1.Novos documentos (LEPLOP)\1.Pessoal\Geologia\Doutorado\0.Tese\5.Ensaios\ist\JEFFERSON\D4.xrdml
Comment	Configuration=PW3064/60, Owner=User-1, Creation date=3/2/2007 4:22:01 PM
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffraction system=XPERT-PRO
	Measurement program=Training1, Owner=User-1, Creation date=4/2/2007 11:10:47 AM
Measurement Date / Time	6/26/2014 3:11:22 PM
Operator	Administrador
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	5.0111
End Position [ $^{\circ}$ 2Th.]	59.9111
Step Size [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0500
Scan Step Time [s]	151.8612
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [ $^{\circ}$ 2Th.]	2.12
Offset [ $^{\circ}$ 2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Automatic
Irradiated Length [mm]	3.00
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [ $^{\circ}$ C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [ $\text{\AA}$ ]	1.54060
K-Alpha2 [ $\text{\AA}$ ]	1.54443
K-Beta [ $\text{\AA}$ ]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	35 mA, 40 kV
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

## Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



## Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23.0518	1289.95	0.1968	3.85833	4.16
23.9242	289.58	0.1968	3.71958	0.93
29.4138	23822.28	0.1968	3.03669	76.88
30.7610	30988.20	0.1968	2.90669	100.00
31.4577	984.96	0.1968	2.84389	3.18
33.2727	728.53	0.1968	2.69279	2.35
35.0788	347.02	0.1968	2.55818	1.12
35.9949	2441.90	0.2460	2.49515	7.88
37.2151	616.07	0.1968	2.41609	1.99
39.4368	3828.03	0.2460	2.28495	12.35
40.9513	1882.34	0.2460	2.20388	6.07
43.1923	3607.29	0.2460	2.09459	11.64
44.7511	1046.94	0.2460	2.02518	3.38
47.1638	1538.76	0.1968	1.92706	4.97
47.5438	4400.08	0.1968	1.91254	14.20
48.5466	4421.67	0.2460	1.87535	14.27
50.1627	2142.77	0.2952	1.81866	6.91
50.7717	2036.22	0.2460	1.79826	6.57
56.6182	795.28	0.2460	1.62567	2.57
57.4554	2160.69	0.2952	1.60396	6.97
58.1274	210.85	0.1968	1.58700	0.68
58.6898	232.56	0.3600	1.57183	0.75

## Pattern List: (Bookmark 4)

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-2339	69	Calcite	0.000	0.725	Ca ( C O3 )
*	01-073-2444	37	Dolomite	0.000	0.893	Ca Mg ( C O3 ) <sub>2</sub>