

Thiago Roulien Pires Fagundes

**CARACTERIZAÇÃO LITOFACIOLÓGICA, PETROGRÁFICA E
HIDROGEOQUÍMICA DAS TUFAS CALCÁRIAS DO DEPÓSITO
DEZOITO DE MARÇO, SERRA DO CÂNDIDO, ITAOCARA (RJ)**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2014



UFRJ

Thiago Roulien Pires Fagundes

**CARACTERIZAÇÃO LITOFACIOLÓGICA, PETROGRÁFICA E
HIDROGEOQUÍMICA DAS TUFAS CALCÁRIAS DO DEPÓSITO DEZOITO DE
MARÇO, SERRA DO CÂNDIDO, ITAOCARA (RJ)**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Renato Rodriguez Cabral Ramos
Luís Henrique Sapiensa Almeida

Rio de Janeiro

Março de 2014

THIAGO, Roulien Pires Fagundes

Caracterização litofaciológica, petrográfica e hidrogeoquímica das tufas calcárias do depósito Dezoito de Março, Serra do Cândido, Itaocara (RJ) / Thiago Roulien Pires Fagundes - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2014.

xiv, 109 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2014.

Orientador(es): Renato Rodriguez Cabral Ramos, Luís Henrique Sapiensa Almeida

1. Geologia. 2. Paleontologia e Estratigrafia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Renato, Rodriguez Cabral Ramos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Caracterização litofaciológica, petrográfica e hidrogeoquímica das tufas calcárias do depósito Dezoito de Março, Serra do Cândido, Itaocara (RJ).

Thiago Roulien Pires Fagundes

CARACTERIZAÇÃO LITOFACIOLÓGICA, PETROGRÁFICA E
HIDROGEOQUÍMICA DAS TUFAS CALCÁRIAS DO DEPÓSITO DEZOITO DE
MARÇO, SERRA DO CÂNDIDO, ITAOCARA (RJ)

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientador(es):

Renato Rodriguez Cabral Ramos
Luís Henrique Sapiensa Almeida

Aprovada em:

Por:

Orientador: Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (UFRJ)

Dra. Kátia Leite Mansur (UFRJ)

Dra. Jane Nobre Lopes (CPRM)

À minha família e meus amigos, que sempre apoiaram e incentivaram minhas decisões.

Agradecimentos

Ao prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos e ao geólogo Luís Henrique Sapiensa Almeida pela orientação, companheirismo, confiança e amizade ao longo deste período.

Ao Programa de Formação de Recursos Humanos em Biossedimentologia da Petrobrás (PRH-PB-18) por financiar o projeto e pela concessão de bolsa.

Ao Museu Nacional - UFRJ e ao Laboratório de Geologia Sedimentar do IGEO - UFRJ e a toda sua equipe pelo suporte e autorização para o uso do espaço para armazenamento e descrição das amostras coletadas, bem como, o uso do microscópio petrográfico.

Ao prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr. e a toda sua equipe do Laboratório de Hidrogeologia do IGEO - UFRJ pelo empréstimo dos multiparâmetros e autorização para o uso do software para caracterização hidrogeoquímica.

Ao prof. Dr. José Marcus Godoy e a toda sua equipe do Laboratório de Caracterização de Águas da PUC - Rio pelas análises laboratoriais efetuadas e pelo empréstimo do material para coleta de água e realização do processo de titulação em campo.

Ao prof. Dr. Leonardo Borghi pelas discussões na etapa de descrição das lâminas petrográficas.

Aos amigos e estudantes de graduação em Geologia do IGEO – UFRJ: Artur Iró Rodrigues, Lucas Gabriel Silva de Aguiar, Luiz Felipe de Queiroz Ferreira Braga e Roberto Pasquale da Cruz Trotta pela ajuda nas etapas de campo.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.” – Eleanor Roosevelt

Resumo

FAGUNDES, Thiago Roulien Pires. **Caracterização litofaciológica, petrográfica e hidrogeoquímica das tufas calcárias do depósito Dezoito de Março, Serra do Cândido, Itaocara (RJ)**. 2014. xiv, 109 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Depósitos de tufas calcárias das serras do Cândido e das Águas Quentes constituem os únicos deste tipo no estado do Rio de Janeiro. Tufas são depósitos calcários continentais porosos, formados em águas não termais de superfície e que tipicamente contém restos e vestígios de macrófitas, micrófitas, invertebrados e microorganismos. A área de estudo está localizada na Unidade São Joaquim, representada por mármore calcítico de textura sacaroidal, que constitui o grande corpo contínuo orientado segundo NE-SW, que forma as serras do Cândido e das Águas Quentes. O depósito Dezoito de Março situado na vertente sudeste da Serra do Cândido é composto por diversos depósitos de tufa ativos e inativos localizados na base da serra, ao longo de uma drenagem alimentada tanto por águas superficiais, como por águas oriundas de diversas ressurgências, condicionadas por juntas horizontais e sub-horizontais, que estão associadas um padrão de fraturamento no mármore. A precipitação físico-química de minerais de CaCO_3 dá-se principalmente pela perda de CO_2 quando a água se precipita dos degraus, sendo acelerada pela agitação da água e/ou atividade bacteriana. Na base das cascatas ocorrem pequenos corpos d' água onde há constante deposição de restos vegetais, como folhas e galhos, bem como sedimentos arenosos. O objetivo do presente trabalho é a caracterização litofaciológica e petrográfica das tufas, bem como a caracterização hidrogeoquímica das águas associadas aos depósitos de tufas ativas. Foram definidas cinco distintas litofácies: fitohermal estromatolítica, fitohermal macrofítica, macrodetrítica fitoclástica, macrodetrítica litoclástica e espeleotema de cascata, com base em suas características macroscópicas e microscópicas. A caracterização hidroquímica da água associada a nascente cárstica apresentou uma alta concentrações de CaCO_3 dissolvido, assim como valores positivos para os índices de saturação em calcita, o que explica a ocorrência de deposição ativa de tufas no depósito Dezoito de Março.

Palavras-chave: tufas; fácies; hidrogeoquímica.

Abstract

FAGUNDES, Thiago Roulien Pires. **Characterization litofaciological, petrographic and hydrogeochemical of calcareous tufa deposit of Dezoito de Março, Serra do Cândido, Itaocara (RJ)**. 2014. xiv, 109 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Deposits of calcareous tufa of the Cândido and Águas Quentes highlands are the only of this kind in the state of Rio de Janeiro. Tufas are secondary continental scale deposits formed on freshwaters and typically contains remains of macrophytes, microphytes, invertebrates and microorganisms. The study area is located in São Joaquim Unit, represented by calcitic marbles with saccharoidal texture, which is the biggest continuous body oriented in NE-SW, which form the mountains of Cândido and Águas Quentes. The Dezoito de Março deposit is located in the southeastern part of Cândido highlands and is composed of several deposits of active and ancient tufa, along a drainage fed by both surface and subsurface resurgence waters, conditioned by subhorizontal joints, that are associated with a pattern of fracturing in marble. The physico-chemical precipitation of CaCO_3 minerals and subsequent formation of tufa deposits occurs mainly by the loss of CO_2 , being accelerated by stirring on the water flow and/or bacterial activity. At the base of the tufa cascade occur small water bodies where constant deposition of plant debris, such as leaves and twigs, as well as sandy sediments are preserved. The objective is to obtain a characterization of litofaciological and petrographic features of tufa rocks and the hydrogeochemical parameters of waters associated with active deposits. Five distinct lithofacies were defined: estromatolitic fitohermal, macrophytic fitohermal, macrodetritic fitoclastic, litoclastic macrodetritic and espeleotems cascade, based on their macroscopic and microscopic features. The hydrochemical characterization of water associated with karst spring showed high concentrations of dissolved CaCO_3 , as well as positive values for saturation index for calcite, which explains the occurrence of active deposition of tufa in Dezoito de Março deposit.

Key-Words: tufa; facies; hydrogeochemical.

Lista de figuras

- Figura 1** – Imagem de Wikipédia mostrando a localização do município de Itaocara no estado do Rio de Janeiro. Acessado em janeiro de 2013.....4
- Figura 2** – Mapa do *Google Maps*, mostrando o trajeto percorrido desde o município do Rio de Janeiro/RJ até o município de Itaocara/RJ. Acessado em janeiro de 2014.....5
- Figura 3** – Mapa da compartimentação tectônica da região sudeste brasileira e em destaque o segmento setentrional da Faixa Ribeira, modificado de Heilbron *et al.*, 2004a. Legenda: (1) coberturas Fanerozóicas; (2) rochas alcalinas do K/Eoceno; (3) Domínio Externo da Faixa Brasília; (4) Domínio Interno da Faixa Brasília; (5) Megassequência Andrelândia autóctone; (6) Supergrupo Bambuí do Cráton do São Francisco; (7) Embasamento do Cráton do São Francisco; (8) a (15): terrenos da Faixa Ribeira: (8) Domínio Andrelândia do Terreno Ocidental; (9) Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental; (10) Terreno Paraíba do Sul; (11) Terreno Apiaí; (12) Terreno Embú; (13) Ca: Domínio Cambuci, IT: Klippe Italva, Cos: Domínio Costeiro do Terreno Oriental; (14) arco magmático Rio Negro do Terreno Oriental; (15) Terreno Cabo Frio.....7
- Figura 4** – Domínios tectônicos da Faixa Ribeira Setentrional. Legenda: (1) Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental; (2) Klippe Paraíba do Sul; (3) a (5): Terreno Oriental, (3) Domínio Costeiro; (4) Domínio Cambuci; (5) Klippe Italva; (6) granitóides tipo-S ou híbridos meta a peraluminosos; (7) granitóides tipo-I metaluminosos. Cidades: (Ca) Cantagalo; (Sa) São Sebastião do Alto; (Ic) Itaocara; (Cb) Cambuci; (Sp) Santo Antônio de Pádua; (Re) Recreio; (Iv) Italva; (Jp) São João do Paraíso; (Ub) São José de Ubá; (Lm) Laje do Muriaé; (Mu) Muriaé; (Ip) Itaperuna; (Bj) Bom Jesus do Itabapoana; (Vs) Varre-Sai; (Gu) Guaçuí; (Ep) Espera Feliz (PEIXOTO & HEILBRON, 2010).....8
- Figura 5** – Mapa e perfil geológico-estrutural do Domínio Italva na região NE do estado do Rio de Janeiro e em destaque a localização correspondente a Serra do Cândido (PEIXOTO & HEILBRON, 2010).....12
- Figura 6** – Detalhe de um bloco de mármore próximo ao depósito Dezoito de Março, mostrando cristais romboédricos de calcita bem desenvolvidos com uma clivagem bem marcada em duas direções.....13
- Figura 7** – Corpos contínuos de mármore que constituem as serras das Águas Quentes e do Cândido na região Centro Norte do estado do Rio de Janeiro (Modificado de MATOS *et al.*, 1980).....13
- Figura 8** – Normais climatológicas mostrando as médias de precipitação (mm) e temperatura (°C) entre o período de 1972 e 2008. (Fonte: Estação meteorológica de Cordeiro – INMET, 2009).....15
- Figura 9** – Esquema comparativo entre tufa e os demais carbonatos continentais de superfície e subsuperfície (Modificado de PENTECOST & VILES, 1994).....18

- Figura 10** – Depósitos tufáceos da Serra do Cândido, em destaque os depósitos estudados por Corrêa (2001): (1) Dezoito de Março, (2) Caxangá I, (3) Caxangá II, (4) Mirindiba, (5) Boi Morto. Modificado de *Google Earth* em setembro de 2013.....31
- Figura 11** – (A) Foto do interior do abrigo-sob-rocha Caxangá I (Fonte: NICOLA, 2006); (B) espeleotema do tipo cortina e *gours* no interior do abrigo (Fonte: CORRÊA, 2011); (C) estruturas semelhantes à biohermas no pavimento do abrigo (Fonte: CORRÊA, 2011); (D) amostra com laminações onduladas formando estruturas domais semelhantes às estruturas encontradas em estromatólitos (CORRÊA, 2011).....32
- Figura 12** – (A) Vista frontal de Caxangá II (CORRÊA, 2011); (B) modelo de tufa de vertente de Pedley (1990).....33
- Figura 13** – (A) Vista lateral de Mirindiba; (B) Foto da base do depósito com moldes de raízes e estruturas estromatolíticas (CORRÊA, 2011).....34
- Figura 14** – Panorama frontal do depósito Boi Morto, que representa a maior tufa de vertente já descoberta na Serra do Cândido. Foto de outubro de 2013.....35
- Figura 15** – (A) Visão panorâmica, foto de janeiro de 2014; e (B) vista frontal do depósito Dezoito de Março, foto de outubro de 2013; (C) primeira tufa observada no sopé da serra, com tufa em cascata, e a jusante uma pequena represa com forma convexa contendo colônias algálicas, foto de outubro de 2012.....36
- Figura 16** – *Cooler* utilizado para refrigeração das amostras em campo. Foto de outubro de 2013.....43
- Figura 17** – (A) Coleta das amostras com o frasco em destaque; (B) filtragem das águas amostradas com um filtro de celulose com porosidade de 0,45 μm , com o auxílio de uma seringa a vácuo; (C) Medição em campo do pH com o aparelho *Hanna HI 98128*. Fotos de janeiro de 2014.....44
- Figura 18** – (A) Início da titulação com 20 ml de amostra de água coletada com a adição do indicador misto, percebe-se a coloração amarelada; (B) fim da titulação, com a amostra já com a cor avermelhada, indicando que o pH atingiu o valor de 4,5. O aparelho utilizado tanto para adicionar quanto medir o ácido (H_2SO_4) chama-se bureta eletrônica.....46
- Figura 19** – Seção topográfica e geológica do depósito Dezoito de Março, com doze dos pontos estudados ao longo da área.....49
- Figura 20** – Depósito de tufa em cascata com aproximadamente 8 m de altura, próximo à base da serra, obtida em maio de 2012. Observa-se que a predominância do fluxo a partir de uma surgência em fratura. A drenagem superficial encontrava-se praticamente seca.....50
- Figura 21** – Imagem do satélite *Google Earth* de 21 de dezembro de 2014, com destaque para o depósito Dezoito de Março e a sua densa vegetação associada.....51

- Figura 22** – (A) Depósito ativo de tufa em cascata com macrófitas autóctones sendo incrustadas; (B) foto de detalhe mostrando folhas transportadas pela drenagem (seta vermelha) e macrófitas começando a serem envolvidas pela precipitação carbonática (seta amarela); (C) amostra de mão retirada de uma tufa ainda em formação, mostrando que a matéria orgânica ainda encontra-se preservada. Fotos de outubro de 2012.....52
- Figura 23** – (A) Tufa em formação com algas presentes no leito da represa (seta vermelha); (B) esteiras algálicas; (C) filamentos algálicos auxiliando a precipitação carbonática em uma folha. Fotos de outubro de 2013.....53
- Figura 24** – (A) Depósito inativo de tufa calcária com aproximadamente 7 metros de altura; (B) tufa com moldes de macrófitas; (C) tufa com molde de folha; (D) tufa com raízes pendentes, típica de cascatas; (E) tufa com molde de galhos. Fotos “A”, “B”, “D” e “E” de outubro de 2013 e “C” de maio de 2012.....54
- Figura 25** – (A) Depósito tufáceo com raízes pendentes formando uma cavidade por trás da cascata, foto de outubro de 2012; (B) tufa inativa que formou um pequeno abrigo-sob-rocha, observa-se as raízes pendentes, foto de maio de 2012; (C) tufa com feições similares a espeleotemas, tais como colunas e estalactites, foto de outubro de 2012; (D) outro abrigo-sob-rocha formado por raízes pendentes, foto de abril de 2013.....55
- Figura 26** – (A) Panorama geral mostrando depósitos ativos e inativos de tufas calcárias adjacentes; (B) detalhe do depósito inativo; (C) detalhe do depósito ativo. Fotos de outubro de 2013.....57
- Figura 27** – (A) Depósito tufáceo inativo em maio de 2012 e, (B) o mesmo depósito, ativo, precipitando tufa na cascata em outubro de 2012.....58
- Figura 28** – Bandas de calcita espática mais claras intercaladas a níveis micríticos mais escuros, esta alternância é mais bem observada no microscópio. As laminações desenvolvem feições domais que se assemelham as estruturas encontradas nos estromatólitos.....60
- Figura 29** – Amostras serradas (A) TH-3, (B) TH-1, (C) MN-173-RS, (D) DM-1C; amostras laminadas com níveis mais claros de cor bege (seta vermelha) intercalados a níveis mais escuros acinzentados (seta amarela), que constantemente desenvolvem feições domais, além disso, há intercalações lenticulares da fácies macrodetrítica fitoclástica (Mf) (seta laranja)....61
- Figura 30** – Feições microscópicas típicas da fácies fitohermal estromatolítica (Fe). Fotomicrografia da lâmina MN173-RS com escala de 2000 µm mostrando laminações escuras micríticas tipicamente de origem microbiana, intercaladas a lâminas espáticas isópacas e mais claras, (A) nicóis paralelos e (B) nicóis cruzados. Fotomicrografia da lâmina MN185-RS com escala de 1000 µm mostrando feições domais similares as estruturas encontradas em estromatólitos com cristais sintaxiais de calcita microespática perpendiculares ao acamamento (seta vermelha), (C) nicóis paralelos e (D) nicóis cruzados. Fotomicrografia da lâmina TH1-A com escala de 2000 µm, exibindo feições domais ricas em micrita, mas com uma banda mais espessa de calcita microespática (seta amarela), (E) nicóis paralelos e (F) nicóis cruzados.....62
- Figura 31** – Córrego a jusante de uma tufa em cascata, com colônias algais e bacterianas de aspectos gelatinoso, associados à lama carbonática. Foto de outubro de 2013.....63

Figura 32 – Fotomicrografias: (A – lâmina MN169-RS) e (B – lâmina DM-2E-A) com escala de 500 μm e nicóis cruzados e paralelos, respectivamente, apresentando vestígios de filamentos algais; (C – lâmina TH1-A) com escala de 2000 μm e nicóis paralelos, com prováveis filamentos de cianobactérias radiados e porosidade interfilamentosa; (D – lâmina MN185-RS) e (E – lâmina DM-2D) com escala de 2000 μm e 1000 μm , respectivamente, e nicóis paralelos, com estrutura arborecescente formada por cristais carbonáticos; (F – lâmina MN169-RS) com escala de 500 μm e nicóis cruzados, mostrando *shrubs* cristalinos (seta vermelha) imersos em uma textura grumosa, que grada a uma textura micrítica.....64

Figura 33 – Fotomicrografias da lâmina TH1-B com escala de 2000 μm , exibindo uma textura grumosa circular (seta vermelha) e uma textura micrítica laminada, (A) com nicóis paralelos e (B) com nicóis cruzados; e (C) foto da lâmina DM-2C-A com nicóis cruzados e escala de 500 μm , exibindo uma textura grumosa associada a processos microbianos, e no centro ocorre um cristal de biotita (seta amarela).....66

Figura 34 – Fotomicrografias com nicóis cruzados da lâmina TH1-B, (A) com escala de 2000 μm mostrando um cimento de calcita espática (seta vermelha) imerso em uma textura micrítica, e (B) com escala de 1000 μm exibindo em destaque uma laminação micrítica concêntrica (seta amarela).....67

Figura 35 – (A) e (B) Fotos da amostra DM-3 com um corte longitudinal e transversal, respectivamente, mostrando moldes de briófitas que foram incrustadas por carbonato de cálcio, e que se encontram orientadas, possivelmente, devido ao curso de água da drenagem que alimentava a área; (C) macrófitas *in situ* sofrendo precipitação carbonática, foto de outubro de 2012; (D) local de onde foi retirada a amostra DM-3, foto de outubro de 2013....69

Figura 36 – Fotomicrografias com nicóis cruzados da lâmina DM-3, (A) e (B) com escala de 2000 μm , mostrando a textura típica encontrada nesta microfácies com moldes de macrófitas que foram cimentados por carbonato de cálcio, produzindo uma rocha de alta porosidade; (C) com escala de 500 μm , com a seta vermelha mostrando um cimento fibro-radiado de calcita espática que se desenvolveu em torno do poro; (D) foto em maior detalhe, com a seta amarela marcando o poro, e a seta vermelha o cimento calcítico.....70

Figura 37 – (A) e (B) Contexto de campo com represas formadas a jusante das cascatas, onde se depositam galhos, folhas, etc., que foram transportados ao longo da drenagem e, que a partir da qual se inicia a precipitação carbonática. Fotos de outubro de 2013; (C) tufa macrodetrítica fitoclástica com moldes de galhos preservados. Foto de janeiro de 2014.....72

Figura 38 – Amostras de tufas calcárias macrodetríticas fitoclásticas, (A) DM-1D e (B) TH-3, exibindo em destaque (seta vermelha) moldes bem preservados de folhas; (C) TH-2, (D) DM-2B e (E) DM-2D, mostrando moldes de galhos e uma alta porosidade.....73

Figura 39 – Fotomicrografias com nicóis cruzados e escala de 2000 μm , das lâminas: (A) DM-1C-B, mostrando um provável molde de galho preenchido por cimento carbonático (seta vermelha); (B) DM-2D, (C) DM-2E-A, (D) MN169-RS e (E) MN185-RS, exibindo uma porosidade de forma cilíndrica, provavelmente, devido a cortes transversais em moldes de galhos. Em destaque, crescimento de um revestimento carbonático em torno da porosidade (seta amarela); (F) MN178-RS, com a seta laranja mostrando os *shrubs* cristalinos (calcitas espáticas fibro-radiadas).....74

- Figura 40** – (A) Aspecto geral de afloramento de tufa litoclástica. Foto de outubro de 2012; (B), (C) e (D) conglomerados maciços formados por clastos de litologias do embasamento e intraclastos de tufas mais antigas. Fotos de outubro de 2013.....76
- Figura 41** – (A) Abrigo-sob-rocha formado a partir da evolução das tufas ao redor de raízes pendentes com formação de feições peculiares, como destacado nas fotos (B) e (C). Fotos de maio de 2012.....78
- Figura 42** – Depósito inativo de tufa calcária com colunas formadas a partir da precipitação carbonática ao redor de raízes pendentes. Foto de outubro de 2013.....79
- Figura 43** – Fotomicrografias da lâmina TH-2 mostrando em destaque (seta vermelha) cimento em franja de calcita microespática, com aspecto fibro-radiado para dentro do poro: (A) e (B) com escala de 2000 μm e nicóis cruzados e paralelos, respectivamente; (C) e (D) com escala de 500 μm e nicóis cruzados e paralelos, respectivamente; (E) Foto da amostra TH-2, em destaque (seta amarela) notar que a cimentação desenvolve crostas em torno das paredes dos poros.....81
- Figura 44** – Diagramas de Piper para as amostra d'água coletadas. Em ambas as datas e pontos coletados as águas são classificadas como cálcio-carbonatadas (Ca-HCO_3).....86
- Figura 45** – Amostra MN185-RS mostrando uma alternância de texturas porosas (seta vermelha) e texturas laminadas (seta amarela).....89

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de tufas calcárias (Modificado de PEDLEY, 1990, p. 144-145).....	22
Tabela 2 – Classificação de tufas calcárias (Modificado de FORD & PEDLEY, 1996, p.130).....	24
Tabela 3 – Classificação de carbonatos (Modificado de DUNHAM, 1962).....	25
Tabela 4 – Classificação de carbonatos (Modificado de EMBRY & KLOVAN, 1971).....	25
Tabela 5 – Modelo de ambiente deposicional de tufas adaptado de Pedley (1990), Ford & Pedley (1996) e Carthew (2003a) (Modificado de CORRÊA, 2011, p.34).....	28
Tabela 6 – Classificação de porosidade de carbonatos (Modificado de CHOQUETE & PRAY, 1970).....	29
Tabela 7 - Localização dos pontos em UTM, utilizando o <i>Datum</i> WGS 1984, Zona 23S (Modificado de CORRÊA, 2011).....	31
Tabela 8 – Identificação das amostras de mão e a(s) sua(s) respectiva(s) lâmina(s) confeccionada(s).....	47
Tabela 9 – Tabela de fácies tufáceas com suas respectivas descrições, proposta para o depósito Dezoito de Março.....	59
Tabela 10 – Valores obtidos para os parâmetros medidos e o teste de alcalinidade (titulação) realizado em campo.....	82
Tabela 11 – Concentrações de Ca, Mg e HCO_3^- em mg/L, valores obtidos pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC-Rio (LABAGUAS).....	83
Tabela 12 – Parâmetros derivados calculados com os <i>softwares PHREEQC Interactive v.3.0.6</i> e <i>AquaChem v.5.1</i>	84
Tabela 13 – Comparação entre a classificação litofaciológica proposta neste trabalho e as demais classificações de tufas calcárias de Ford & Pedley (1996) (Tabela 1) e Pedley (1990) (Tabela 2) e de carbonatos de Embry & Klován (1971) (Tabela 4) e Dunhan (1962) (Tabela 3).....	91

Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
<i>Abstract</i>	viii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	xiv
Sumário.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Objetivos.....	3
2 ÁREA DE ESTUDO.....	4
3 ASPECTOS REGIONAIS.....	6
3.1 Geologia.....	6
3.2 Clima.....	14
3.3 Geomorfologia.....	16
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1 Tufas.....	18
4.1.1 Conceitos.....	18
4.1.2 Gênese.....	19
4.1.3 Tipos e classificações.....	22
4.1.4 Depósitos tufáceos da Serra do Cândido.....	30
4.2 Hidrogeoquímica.....	37
5. METODOLOGIA.....	40
5.1 Revisão bibliográfica.....	40
5.2 Trabalhos de campo.....	41
5.2.1 Coleta de amostras.....	41
5.2.2 Titulação.....	45
5.3 Análises laboratoriais.....	47
5.3.1 Petrografia.....	47
5.3.2 Hidroquímica.....	48
6. RESULTADOS.....	49

6.1 Contexto geológico e geomorfológico.....	49
6.2 Classificação dos depósitos.....	52
6.2.1 Depósitos ativos.....	52
6.2.2 Depósitos inativos.....	53
6.3 Descrição faciológica.....	58
6.3.1 Fácies.....	58
6.3.1.1 Fácies fitohermal estromatolítica (Fácies Fe).....	59
6.3.1.2 Fácies fitohermal macrofítica (Fácies Fm).....	67
6.3.1.3 Fácies macrodetrítica fitoclástica (Fácies Mf).....	71
6.3.1.4 Fácies macrodetrítica litoclástica (Fácies MI).....	75
6.3.1.5 Fácies espeleotema de cascata (Fácies Ec).....	77
6.3.2 Feições pós-deposicionais.....	80
6.4 Caracterização hidrogeoquímica.....	82
7 DISCUSSÕES.....	87
8 CONCLUSÕES.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXO 1 - Ponto SC – 01. Coleta de outubro de 2013. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	102
ANEXO 2 - Ponto SC – 01. Coleta de outubro de 2013. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	103
ANEXO 3 - Ponto SC – 02. Coleta de outubro de 2013. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	104
ANEXO 4 - Ponto SC – 02. Coleta de outubro de 2013. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	105
ANEXO 5 - Ponto SC – 01. Coleta de janeiro de 2014. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	106

ANEXO 6 - Ponto SC – 01. Coleta de janeiro de 2014. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	107
ANEXO 7 - Ponto SC – 02. Coleta de janeiro de 2014. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	108
ANEXO 8 - Ponto SC – 02. Coleta de janeiro de 2014. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.....	109

1. INTRODUÇÃO

Nos anos de 1990, durante os trabalhos de prospecção e pesquisa realizados pela equipe da *Sociedade Carioca de Pesquisas Espeleológicas* (SPEC) na região das serras das Águas Quentes (município de Cantagalo / RJ) e do Cândido (município de Itaocara / RJ), foram identificados diversos depósitos de tufa calcária, que constituem o primeiro registro Quaternário desta litologia no estado do Rio de Janeiro (RAMOS *et al.*, 2005).

O depósito de tufa calcária denominado Dezoito de Março está localizado no sopé da vertente sudeste da Serra do Cândido, entre as cotas altimétricas de 170 m e 240 m, nas coordenadas geográficas de latitude 21°47'45"S e longitude 42°10'42"O. Este é formado por antigos depósitos de tufas em cascata e represas distribuídos ao longo da encosta, bem como diversos depósitos atuais ao longo da drenagem.

Destacam-se os depósitos de tufas em cascata, concentrados ao longo da linha de drenagem, em seis degraus com desníveis de 3 a 8 m de altura, compreendidos em um trecho de cerca de 250 m. A água que abastece o baixo curso da drenagem nasce em uma pequena planície aluvial na cota 260 m, bem como se destaca a contribuição hídrica através de surgências de água a partir de fraturas.

1.1 Justificativa

O interesse no estudo sobre tufas calcárias vem ganhando importância nos últimos anos devido às informações paleoambientais e paleoclimáticas obtidas a partir de estudos sedimentológicos e por isótopos estáveis (ALMEIDA, 2011). No Brasil, o estudo sobre tufas é fundamental para reconstituição de variações climáticas do Quaternário tardio (AULER *et al.*, 2001), uma vez que a sua formação e desenvolvimento são influenciados diretamente pelo

clima e, portanto, variam de acordo com a temperatura, taxa de evaporação, regime de chuvas, etc (CORRÊA, 2011).

Além disso, a indústria petrolífera com vista no entendimento destas rochas, devido à semelhança com as estruturas encontradas nas rochas reservatório de origem microbial do Pré-sal, passou a investir em pesquisas relacionadas a carbonatos continentais. Estes depósitos servem como análogos para estudos mais aprofundados sobre produção e exploração destes reservatórios (PAPATERRA, 2010), que vem sendo interpretados como carbonatos lacustres, palustres e, possivelmente, tufas e travertinos (CARMINATTI *et al.*, 2009; WRIGHT, 2012).

Outro aspecto importante quanto aos depósitos tufáceos é que estes desenvolvem estruturas peculiares e de rara beleza e, frequentemente, geram cavidades naturais como abrigos-sob-rocha, com potencial turístico, enaltecendo ainda seu valor espeleológico (BOGGIANI *et al.*, 2002; RAMOS *et al.*, 2005).

Os trabalhos que abordam tufas calcárias no Brasil são escassos e concentram-se nas regiões da Serra da Bodoquena (MS), Serra das Araras (MT) e Rio Salitre (BA) (CORRÊA, 2004; CORRÊA, 2006; OLIVEIRA, 2009). Assim sendo, devido a iminente ameaça imposta pelo avanço da atividade minerária na região Centro-Norte Fluminense, com o intuito de explorar os mármores da região (LEAL, 2012), estudos acadêmicos na Serra do Cândido, tornam-se fundamentais para que haja uma preservação das tufas como importante patrimônio geológico do tipo sedimentar (fácies e estruturas) e paleoambiental (tufa de vertente), com valor científico, didático e paisagístico. Assim como o mapeamento destes corpos carbonáticos, que no caso da Serra do Cândido ainda permanece por ser realizado, visto a dificuldade em se estabelecer uma correlação estratigráfica em função da ocorrência descontínua desses depósitos tufáceos ao longo da serra.

Ademais, embora relevantes, ainda é raro no Brasil o estudo dessas rochas, principalmente no que se refere a seus aspectos petrográficos (OLIVEIRA, 2013). Como

consequência, o estudo faciológico, petrográfico e hidroquímico das tufas calcárias, podem contribuir para um melhor entendimento dos fatores responsáveis pela gênese destes carbonatos, assim como contribuir para com a sua classificação e preservação.

1.2 Objetivo

O presente trabalho estabelece como objetivo principal a caracterização litofaciológica e petrográfica das tufas calcárias do depósito Dezoito de Março, visando o entendimento dos processos formadores destes depósitos carbonáticos continentais na região da Serra do Cândido.

Outro objetivo é a caracterização hidroquímica das águas associadas aos depósitos ativos, a fim de entender os processos de deposição atual.

2. ÁREA DE ESTUDO

O depósito tufáceo Dezoito de Março está localizado na Serra do Cândido, situada no distrito de Laranjais, município de Itaocara/RJ (Figura 1), em uma região geograficamente conhecida como Centro-Norte Fluminense (RAMOS *et al.*, 2005; NICOLA, 2006; CORRÊA, 2011).



Figura 1 – Imagem de Wikipédia mostrando a localização do município de Itaocara no estado do Rio de Janeiro. Acessado em janeiro de 2013.

O acesso à área de estudo saindo da cidade do Rio de Janeiro se inicia na ponte Rio–Niterói (BR-101), seguindo até o município de Itaboraí/RJ, a partir de onde se utiliza a rodovia RJ-116 até à cidade de Nova Friburgo/RJ. Segue-se então pela mesma rodovia até o cruzamento desta com a RJ-160 e daí até a cidade de Cantagalo/RJ. O percurso prossegue

pela RJ-162 passando pelos distritos de Euclidelândia e Boa Sorte, ainda no município de Cantagalo, até o encontro desta com a RJ-166. Através da RJ-166 chega-se ao distrito de Laranjais, no município de Itaocara/RJ (Figura 2). Pouco antes da entrada para Laranjais, em um pequeno trevo, entra-se no sentido sudeste na estrada de terra RJ-184 (para o distrito de Valão do Barro, município de São Sebastião do Alto) e, após aproximadamente 3 km, em uma bifurcação, segue-se pela direita ao longo do sopé da Serra do Cândido, onde se encontra localizado o depósito tufáceo Dezoito de Março.

No total o trajeto partindo do município do Rio de Janeiro/RJ até as tufas do depósito Dezoito de Março no município de Itaocara, possui aproximadamente 260 km de distância, em um trecho de cerca de quatro horas de automóvel.

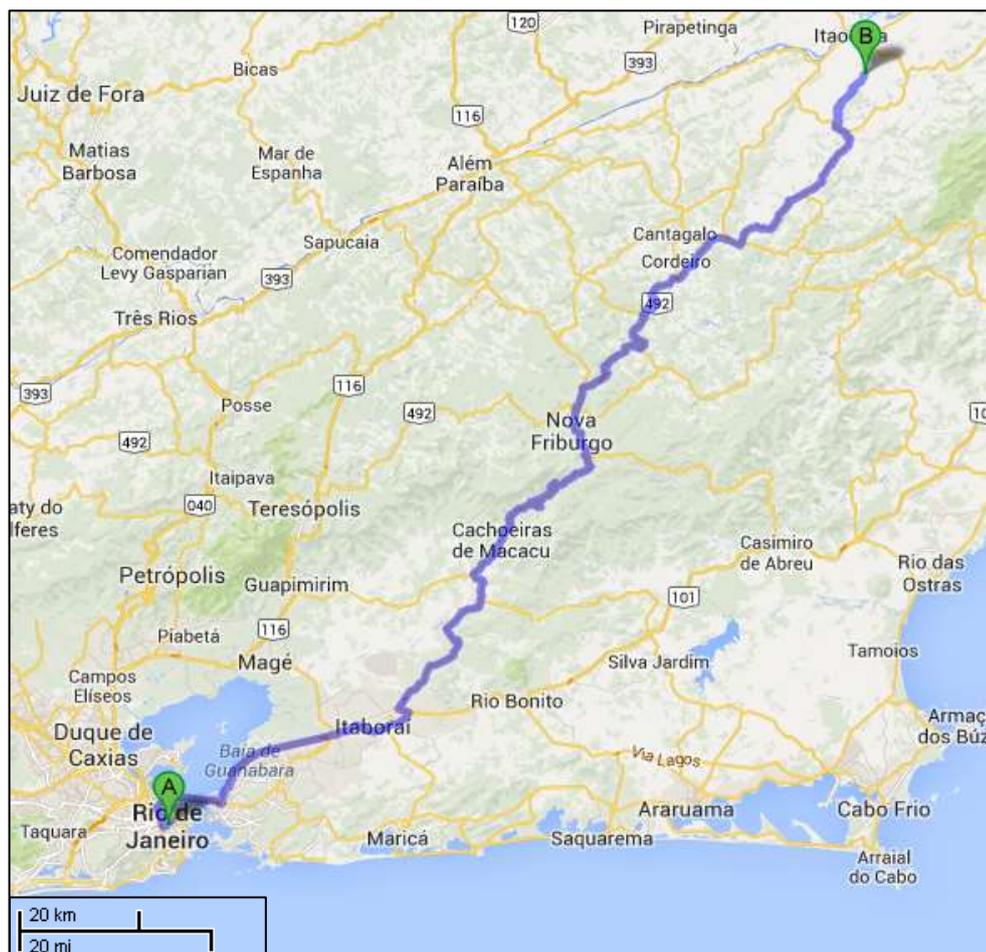


Figura 2 – Mapa do *Google Maps*, mostrando o trajeto percorrido desde o município do Rio de Janeiro/RJ até o município de Itaocara/RJ. Acessado em janeiro de 2014.

3. ASPECTOS REGIONAIS

3.1 Geologia

A compartimentação tectônica da Faixa Ribeira em seu segmento setentrional compreende quatro terrenos tectono-estratigráficos imbricados para NW/W em direção ao Cráton do São Francisco, durante as etapas de convergência brasilianas: Terreno Ocidental (margem são franciscana retrabalhada), Terreno Paraíba do Sul, Terreno Oriental e Terreno Cabo Frio (Figura 3) (HEILBRON *et al.*, 2000, 2004a; TROUW *et al.*, 2000). Os três primeiros foram amalgamados entre 605 e 580 Ma (MACHADO *et al.*, 1996; HEILBRON & MACHADO, 2003), enquanto que o Terreno Cabo Frio foi tardiamente colado ao orógeno durante o Cambriano (SCHMITT *et al.*, 2004). Os terrenos e seus domínios estruturais estão separados por zonas de cisalhamento dúcteis com componente inverso e transpressivo dextral, gerado durante a deformação principal (HEILBRON, 1993; HEILBRON *et al.*, 1998, 2000, 2004a).

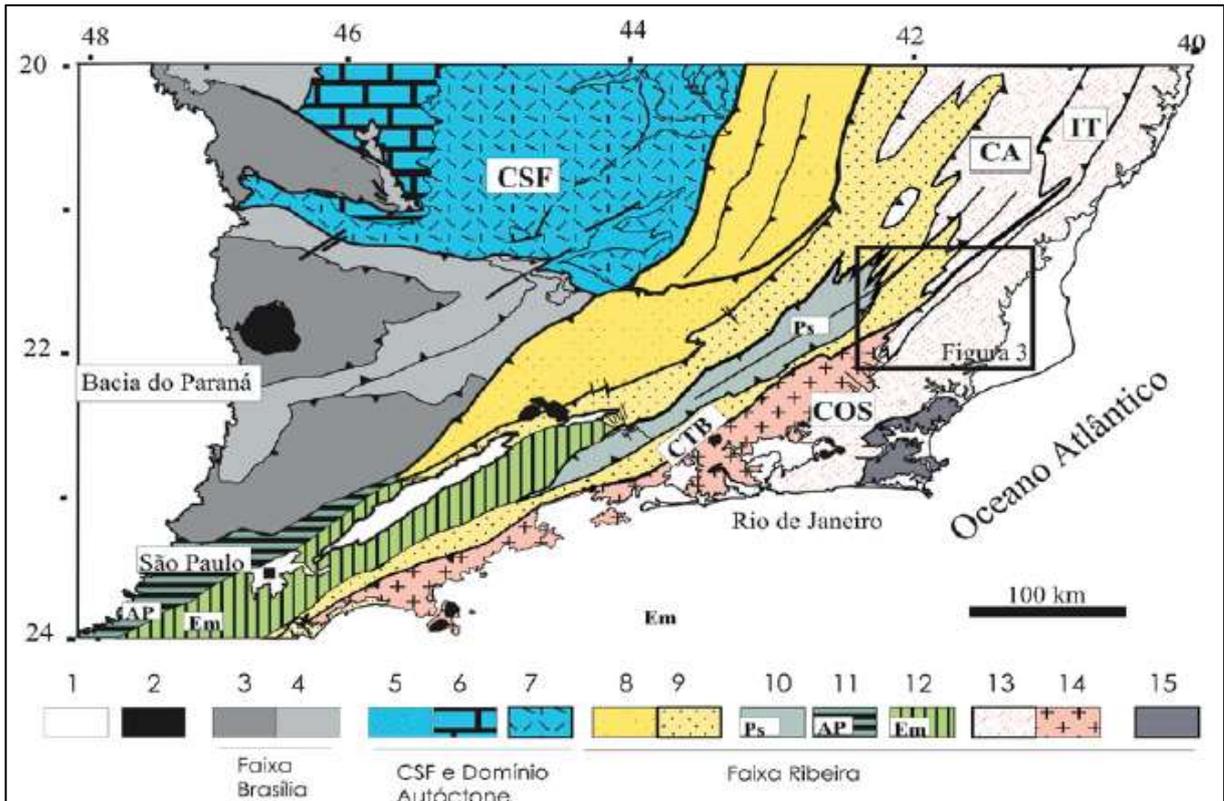


Figura 3 – Mapa da compartimentação tectônica da região sudeste brasileira e em destaque o segmento setentrional da Faixa Ribeira, modificado de Heilbron *et al.*, 2004a. Legenda: (1) coberturas Fanerozóicas; (2) rochas alcalinas do K/Eoceno; (3) Domínio Externo da Faixa Brasília; (4) Domínio Interno da Faixa Brasília; (5) Megassequência Andrelândia autóctone; (6) Supergrupo Bambuí do Cráton do São Francisco; (7) Embasamento do Cráton do São Francisco; (8) a (15): terrenos da Faixa Ribeira: (8) Domínio Andrelândia do Terreno Ocidental; (9) Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental; (10) Terreno Paraíba do Sul; (11) Terreno Apiaí; (12) Terreno Embú; (13) Ca: Domínio Cambuci, IT: Klippe Italva, Cos: Domínio Costeiro do Terreno Oriental; (14) arco magmático Rio Negro do Terreno Oriental; (15) Terreno Cabo Frio.

O Terreno Oriental compreende os domínios Cambuci, Costeiro e Italva, que possuem sua gênese ligada ao desenvolvimento de arcos magmáticos neoproterozóicos no segmento setentrional da Faixa Ribeira, onde os domínios Cambuci e Italva representam as bacias de ante-arco e retro-arco, respectivamente, e o Domínio Costeiro aloja o arco magmático Rio Negro (Figura 4) (PEIXOTO & HEILBRON, 2010). O Domínio Italva representa o compartimento estruturalmente superior do Terreno Oriental nas regiões central e noroeste fluminense, ocorrendo como uma klippe sinformal sobre o Domínio Costeiro, estendendo-se

desde a região de Cantagalo até o sul do estado do Espírito Santo (TUPINAMBÁ *et al.*, 2007).

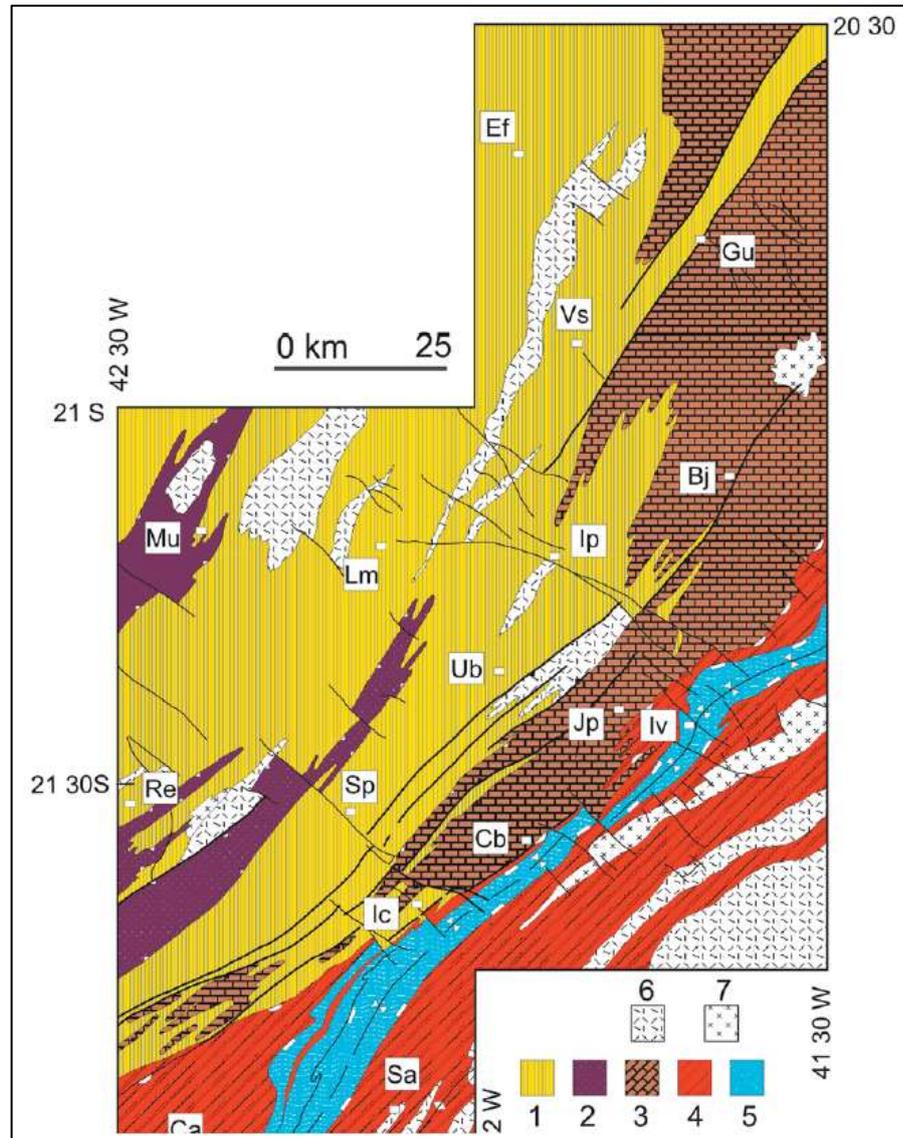


Figura 4 – Domínios tectônicos da Faixa Ribeira Setentrional. Legenda: (1) Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental; (2) Klippe Paraíba do Sul; (3) a (5): Terreno Oriental, (3) Domínio Costeiro; (4) Domínio Cambuci; (5) Klippe Italva; (6) granitóides tipo-S ou híbridos meta a peraluminosos; (7) granitóides tipo-I metaluminosos. Cidades: (Ca) Cantagalo; (Sa) São Sebastião do Alto; (Ic) Itaocara; (Cb) Cambuci; (Sp) Santo Antônio de Pádua; (Re) Recreio; (Iv) Italva; (Jp) São João do Paraíso; (Ub) São José de Ubá; (Lm) Laje do Muriaé; (Mu) Muriaé; (Ip) Itaperuna; (Bj) Bom Jesus do Itabapoana; (Vs) Varre-Sai; (Gu) Guaçuí; (Ep) Espera Feliz (PEIXOTO & HEILBRON, 2010).

Na base da Klippe Italva encontram-se dioritos, gabros e tonalitos do Complexo Rio Negro, e o restante do pacote é ocupado pelas rochas do Grupo Italva. Este grupo por sua vez

é composto por um conjunto de rochas metavulcano-sedimentares, ricas em mármore e anfibolitos, além de apresentarem gnaisses homogêneos e/ou bandados. O metamorfismo principal não ultrapassa a fácies anfibolito, e a deformação principal é moderada, e caracterizada por uma xistosidade grossa e por dobras recumbentes a reclinadas (Figura 3) (TUPINAMBÁ *et al.*, 2007).

Os gnaisses homogêneos apresentam como mineralogia quartzo, granada, muscovita, biotita, e, pontualmente hornblenda, são leucocráticos, finos e de composição granítica a granodiorítica, com raras intercalações de rochas calcissilicáticas, anfibolitos e sillimanita-muscovita-quartzo-xistos. Já os gnaisses bandados predominam na parte superior da sequência, próximo aos mármore, ou na parte inferior, próximo ao contato com as rochas metaplutônicas do Complexo Rio Negro, e são formados por gnaisses mesocráticos, de composição tonalítica, com biotita, hornblenda e plagioclásio cálcico (An₆₈) (TUPINAMBÁ *et al.*, 2007).

O restante do Grupo Italva é representado por uma sequência metacarbonática com espessura entre 500 e 1000 metros. Esta é formada por mármore esbranquiçados, dolomíticos ou calcíticos. Os mármore dolomíticos são maciços, microcristalinos e de aspecto leitoso. Enquanto que os calcíticos apresentam cristais centimétricos, grossos e euédricos de calcita de brilho vítreo. Até um terço da espessura da sequência metacarbonática é ocupada por intercalações de anfibolitos, rochas calcissilicáticas e bandas quartzo-feldspáticas. As rochas calcissilicáticas são compostas por quartzo, plagioclásio, diopsídio, granada, hornblenda e biotita. Já os anfibolitos ocorrem em bandas métricas que desenvolvem uma borda de reação com mármore, contendo epidoto e biotita, além de serem constituídos por hornblenda, plagioclásio, diopsídio, quartzo, titanita, clinozoisita, epidoto, zircão e opacos (TUPINAMBÁ *et al.*, 2007). Dados litogeoquímicos de Ragatky *et al.* (2003) indicam protólitos de basaltos toleíticos, ao passo que dados U-Pb/TIMS de Heilbron & Machado

(2003) indicam uma idade de cristalização de *ca.* 840 Ma e retrabalhamento metamórfico de *ca.* 501 Ma.

Peixoto & Heilbron (2010) subdividiram o Domínio Italva em seis unidades lito-estratigráficas (Figura 5), que compreendem gnaisses tonalíticos a granodioríticos intercalados com mármores e anfibolitos dispostos em faixas NE-SW: Suíte Morro do Escoteiro (composta por biotita muscovita leucognaisse); anfibolitos (que ocorrem associados aos mármores e gnaisses em forma de lentes e *boudins*); Unidade Serra da Prata (representada por hornblenda biotita gnaisse bandado estando sobrepostas as demais unidades do Domínio Italva); Unidade Macuco (composta por granada biotita gnaisse graníticos e tonalíticos, localmente com sillimanita); Unidade São Joaquim (composta por mármores calcíticos e dolomíticos que compõem o relevo mais escarpado da região representado pelas serras das Águas Quentes, do Cândido e Vermelha, a granulometria varia de média a muito grossa com cristais de carbonatos romboédricos bem desenvolvidos podendo chegar a três cm) (Figura 6); Unidade Euclidelândia (representada por biotita muscovita gnaisse granítico a tonalítico, localmente com sillimanita).

A Serra do Cândido está inserida na Unidade São Joaquim do Domínio Italva que representa uma subdivisão do Terreno Oriental da Faixa Ribeira, caracterizada por mármores calcíticos de textura sacaroidal grossa e maciça, com cristais romboédricos bem desenvolvidos, que frequentemente, ocorrem intercalados a anfibolitos e localmente, a gnaisses homogêneos e/ ou bandados e rochas calcissilicáticas (TUPINAMBÁ *et al.*, 2007; PEIXOTO & HEILBRON, 2010).

Os mármores da Unidade São Joaquim teriam sido originados em uma antiga plataforma marinha rasa onde teria sido depositado material carbonático, por atividade química e/ou bioquímica, com eventuais pulsos de material arenoso quartzoso. Enquanto que os gnaisses representariam uma deposição de menor energia, com argilas calcárias em

ambiente mais profundo ou em uma parte mais restrita da bacia. Neste contexto, os anfíbolitos registrariam uma atividade magmática de natureza básica durante a formação de todo o pacote do Grupo Italva (HEILBRON & MACHADO, 2003).

As tufas calcárias de idade quaternária que ocorrem nas serras das Águas Quentes e do Cândido (Figura 7) teriam a sua gênese associada à dissolução dos mármore da Unidade São Joaquim, a partir das drenagens superficiais e as surgências em fraturas (RAMOS *et al.*, 2005).

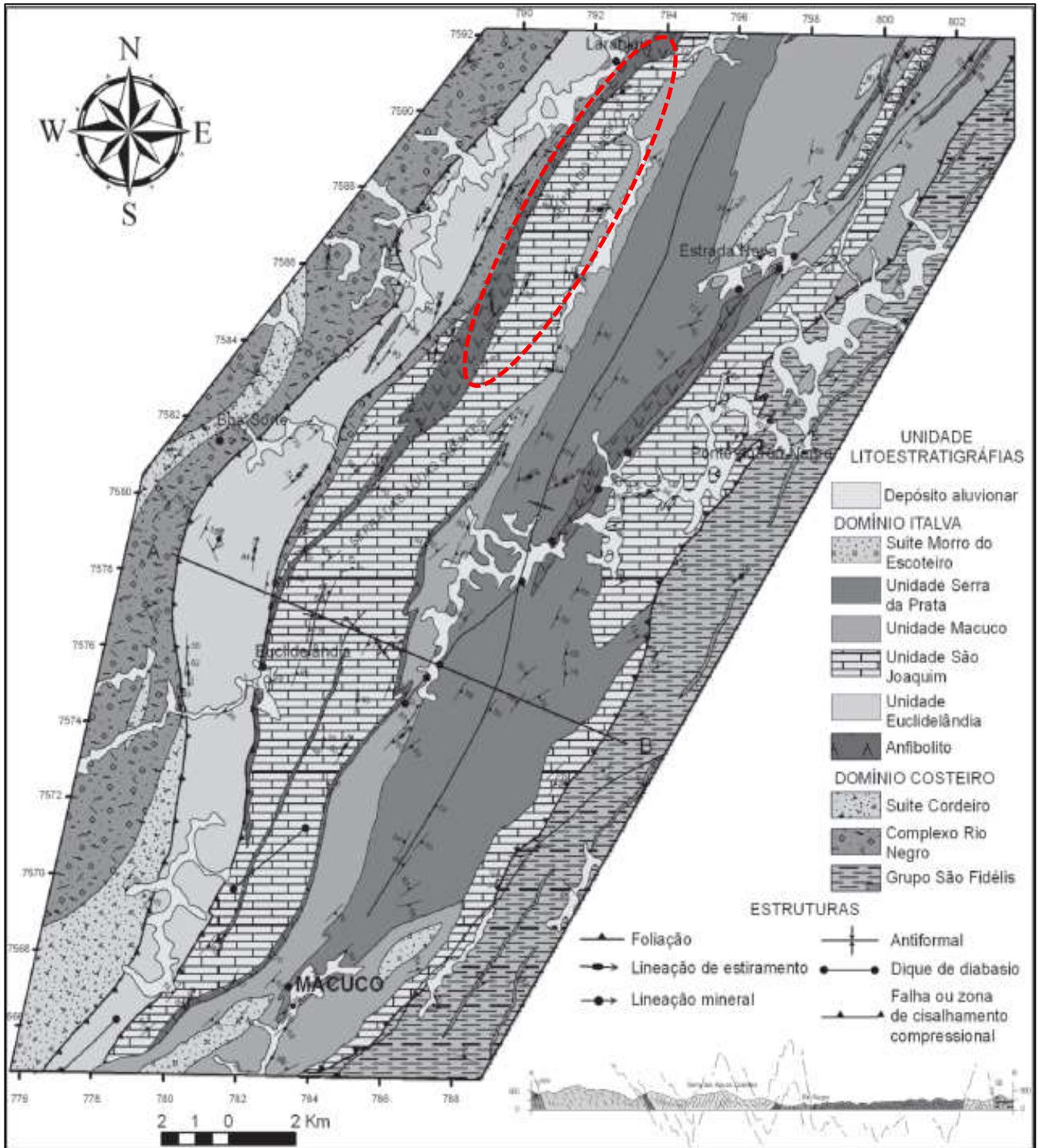


Figura 5 – Mapa e perfil geológico-estrutural do Domínio Itá na região NE do estado do Rio de Janeiro e em destaque a localização correspondente a Serra do Cândido (PEIXOTO & HEILBRON, 2010).



Figura 6 – Detalhe de um bloco de mármore próximo ao depósito Dezoito de Março, mostrando cristais romboédricos de calcita bem desenvolvidos com uma clivagem bem marcada em duas direções.

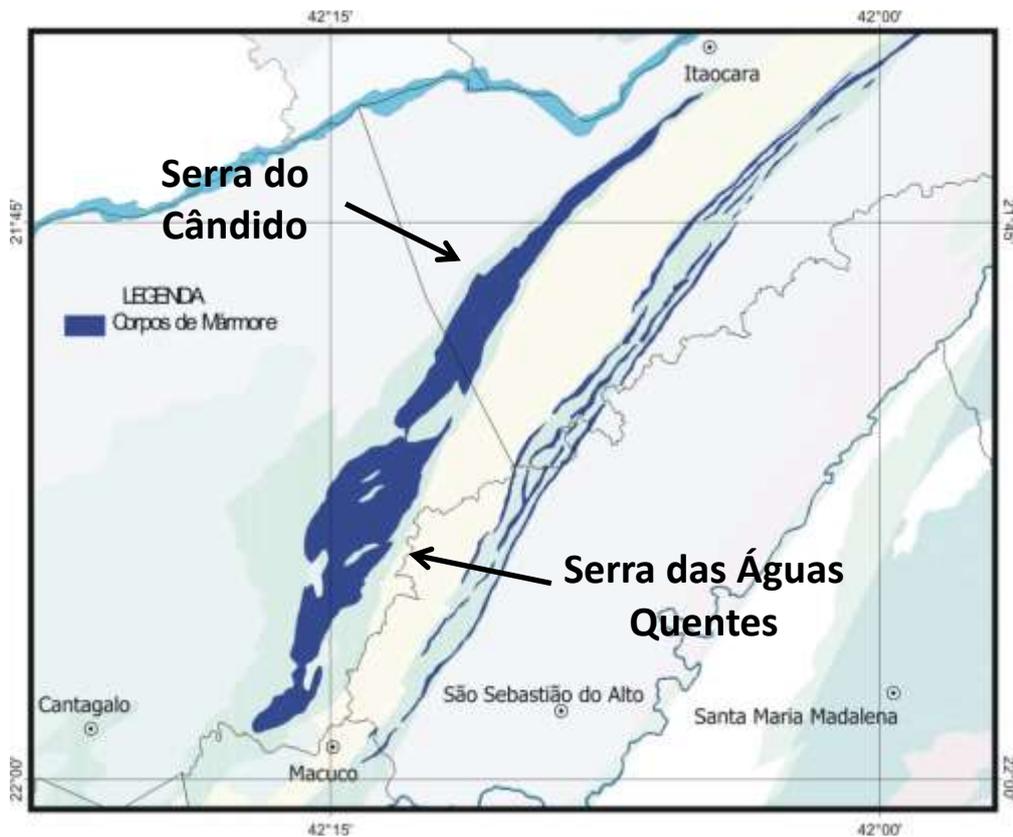


Figura 7 – Corpos contínuos de mármore que constituem as serras das Águas Quentes e do Cândido na região Centro Norte do estado do Rio de Janeiro (DRM, 1980).

3.2 Clima

A região Centro Norte Fluminense está localizada na porção reversa da Serra do Mar, no vale do rio Paraíba do Sul entre as latitudes 21° e 24° S, onde a incidência de radiação solar é alta tornando o clima mais quente (NIMER *et al.*, 1979).

Na região ao redor da área de estudo observa-se uma marcante sazonalidade, que é reflexo do fenômeno de ascensão orográfica que ocorre devido ao fato do vale estar circundado pelas serras da Mantiqueira e do Mar, o que reduz a taxa de precipitação na região. Quando uma massa de ar atinge uma encosta e começa a subi-la, se resfria e precipita, resultando em chuvas abundantes a barlavento da escarpa, e baixa precipitação a sotavento, como no caso do Paraíba do Sul. Por outro lado, a proximidade com a zona costeira resulta em uma alta umidade relativa do ar na região (NIMER *et al.*, 1979).

A partir das normais climatológicas da estação meteorológica de Cordeiro (Figura 8) (INMET, 2009), observam-se duas estações bem definidas, uma com alta taxa de precipitação do final da primavera e até o início do outono, nos meses de novembro a março, e outra com uma clara estação de seca durante o inverno, com baixa precipitação dos meses de abril a setembro. Já a temperatura mínima média encontrada seria de 16°C no mês de julho, e a temperatura máxima média giraria em torno de 24°C no mês de fevereiro.

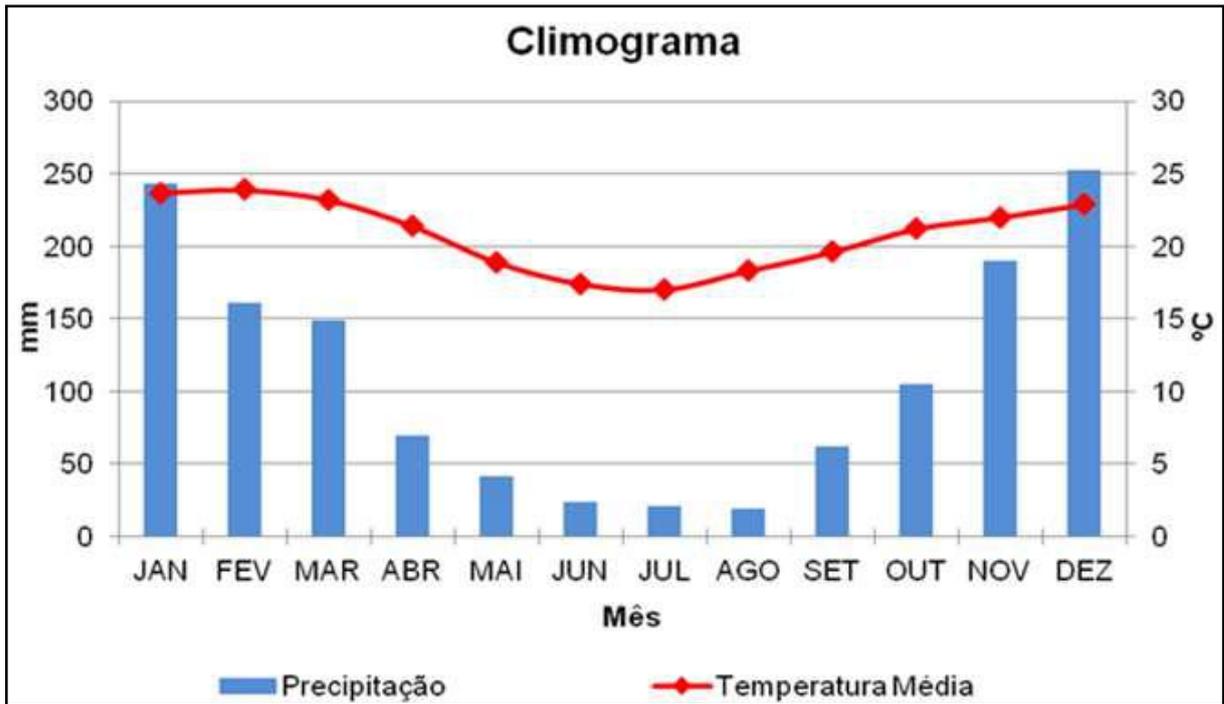


Figura 8 – Normais climatológicas mostrando as médias de precipitação (mm) e temperatura (°C) entre o período de 1972 e 2008. (Fonte: Estação meteorológica de Cordeiro – INMET, 2009).

Assim sendo, o somatório de todos estes fatores resulta em um clima regional quente e semiúmido com períodos de seca que dura de quatro a seis meses (BRASIL, 1983; SANT'ANNA NETO, 2005; CORRÊA, 2011). E o tipo climático predominante na região de acordo com a classificação de Köppen (1948) seria o tropical de altitude, com chuvas no verão, invernos frios e secos, e verões brandos.

Como se sabe, em regiões tropicais o desenvolvimento de depósitos carbonáticos continentais está diretamente relacionado à manutenção de temperaturas elevadas e a disponibilidade hídrica (FORD *et al.*, 1996, CARTHEW *et al.*, 2003, CARTHEW *et al.*, 2006), entretanto isto não ocorre na região, o que se justifica pela sazonalidade encontrada nesta tipologia climática, que por sua vez, a reflete na formação dos depósitos tufáceos.

3.3 Geomorfologia

O Estado do Rio de Janeiro é caracterizado por uma diversidade de feições geomorfológicas resultante, principalmente, da interação entre processos tectônicos e climáticos. Essa diversidade está caracterizada pelos desnivelamentos, superiores a 2.000 metros, em alternância com bacias de rifte, que refletem a influência tectônica na compartimentação do relevo do Rio de Janeiro. Essa influência iniciou-se no Cretáceo, como resultado da fragmentação de Gondwana e prosseguiu com a instalação do oceano Atlântico Sul (ALMEIDA *et al.*, 1976), podendo ser registrada através da neotectônica Quaternária (RICCOMINI, 1989).

A influência erosiva ou climática é marcante na construção dos altos planaltos das serras da Mantiqueira e do Mar, sendo associada aos ciclos Gondwana no Jurássico e pós-Gondwana no Cretáceo. Duas superfícies de erosão são observadas regionalmente no estado do Rio de Janeiro, uma com origem no Paleoceno, chamada de superfície Sul-Americana, e a outra mais recente, do Plioceno, denominada de superfície Velha (KING, 1956).

A compartimentação do relevo do estado do Rio de Janeiro é feita segundo duas unidades morfoestruturais principais: o cinturão orogênico Atlântico e as bacias sedimentares Cenozóicas. O cinturão do Atlântico integra associações litológicas distintas e complexas, que se inserem no segmento central da Faixa Ribeira (TROUW *et al.*, 2000), sendo caracterizado por falhamentos normais que esculpiram os maciços costeiros e interiores, e as escarpas serranas das serras da Mantiqueira e do Mar. Em paralelo formaram-se depressões interplanálticas como a do vale do rio Paraíba do Sul, com alinhamentos serranos escalonados resultantes de controles litológico-estruturais (FERRARI, 1990).

Os municípios de Itaocara e Cantagalo, pertence ao domínio das faixas de dobramentos remobilizados da região do vale do Paraíba do Sul. A Serra do Cândido está inserida no

contexto dos alinhamentos de cristas do Paraíba do Sul, e a morfologia desta área apresenta forte controle estrutural, evidenciado por blocos deslocados e por escarpas e relevos alinhados, que coincidem com os dobramentos e falhamentos originais (BRASIL, 1983).

Localmente, a Unidade São Joaquim do Domínio Italva compõe o compartimento de relevo mais escarpado da região, estando representado pelas serras das Águas Quentes, Vermelha e do Cândido. Localmente, processos intempéricos podem produzir um solo de cor avermelhada que não preserva a estrutura da rocha, formando um relevo suavizado com morros arredondados (PEIXOTO & HEILBRON, 2010).

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Tufas

4.1.1 Conceitos

Tufa é uma rocha sedimentar continental formada a partir da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) em superfície, com temperatura próxima à do ambiente, e que contém tipicamente, restos e vestígios de micrófitas, macrófitas, invertebrados, microorganismos, além de oólitos, micritos e outros tipos de sedimentos carbonáticos. Os depósitos tufáceos, assim como os espeleotemas e travertinos, representam depósitos carbonáticos secundários (Figura 9) (CHAFETZ & FOLK, 1984; FORD, 1989; PEDLEY, 1990; FORD & PEDLEY, 1996).

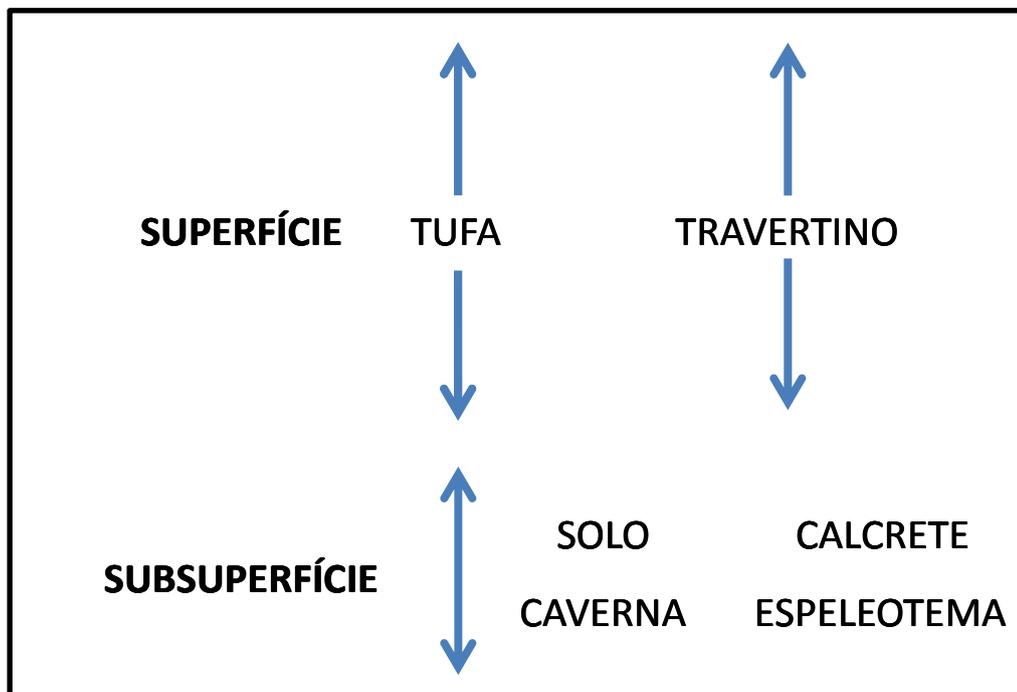


Figura 9 – Esquema comparativo entre tufa e os demais carbonatos continentais de superfície e subsuperfície (Traduzido de PENTECOST & VILES, 1994).

Os travertinos são depósitos carbonáticos maciços associados a fontes hidrotermais, com águas aquecidas a pelo menos 40°C, e que possuem sua formação associada à deposição por queda na temperatura ou atividade de bactérias extremófilas (tolerantes ao calor), o que os difere de tufas, que são calcários continentais formados em temperatura ambiente, ou seja, por fontes não termais (CHAFETZ & FOLK, 1994; FORD, 1989; TUCKER, 1990; PENTECOST *et al.*, 1994; FORD & PEDLEY, 1996). Ademais, tufa é uma rocha porosa que pode apresentar estrutura maciça e/ou laminada (ALMEIDA, 2011).

Depósitos tufáceos são comuns em sucessões quaternárias associadas a exposições de rochas carbonáticas (FORD & PEDLEY, 1996; OLIVEIRA, 2009), e que podem cobrir pequenas áreas, como cachoeiras e nascentes, ou áreas quilométricas, como os depósitos da Serra das Araras/MT (CORRÊA, 2006; CORRÊA & AULER, 2006; CORRÊA *et al.*, 2007; OLIVEIRA, 2009), e da Serra da Bodoquena/MS (BOGGIANI & COIMBRA, 1995; BOGGIANI *et al.*, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2008b; OLIVEIRA, 2009).

Nas tufas, normalmente, há um predomínio de CaCO₃ de granulação fina, variando de argila à areia fina, e com baixo teor de terrígeno associado (BUCCINO *et al.*, 1978; BRANCACCIO *et al.*, 1986; PEDLEY *et al.*, 1996; OLIVEIRA, 2009).

4.1.2 Gênese

A precipitação carbonática para formação de tufas tem início com o processo de carstificação, que resulta da interação de água ácida, formada quando a água meteórica entra em contato com elevados níveis de CO₂ no solo, com a rocha carbonatada, induzindo o processo de dissolução e formação de um composto solúvel em Ca(HCO₃)₂ – bicarbonato de cálcio que, posteriormente, passa a ser transportado em solução (GUIMARÃES, 1974; BICALHO, 2003; CORRÊA, 2006; CORRÊA, 2011).

Os depósitos carbonáticos secundários são formados majoritariamente por calcita, que é o mineral de carbonato mais termoestável e, portanto o mais abundante na natureza. A equação geral que rege a precipitação de calcita é: $\text{Ca}^{+2} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \downarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \uparrow \text{CO}_{2(\text{g})}$ (PETTYJOHN, 1957; BICALHO, 2003; SAMPAIO & ALMEIDA, 2005; CORRÊA, 2011).

A precipitação físico-química de CaCO_3 ocorre com a perda de $\text{CO}_{2(\text{g})}$, devido a evaporação ou turbulência da água. Além disso, é comum sua formação em áreas onde há ressurgência de águas continentais subterrâneas, que emergem de aquíferos saturados em $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e cujas águas, ao chegarem a superfície tendem a perder CO_2 para a atmosfera, visto que os níveis atmosféricos de CO_2 são bem menores do que em subsuperfície, induzindo assim a precipitação carbonática (FORD & WILLIAMS, 1989; FORD & PEDLEY, 1996; PENTECOST, 2001; ZHANG *et al.*, 2001; CORRÊA, 2006; CORRÊA, 2011).

Logo, o desenvolvimento destes carbonatos depende do relevo na área de deposição, das estruturas regionais que podem influenciar na energia da vazão d' água, da abundância hídrica e do clima (CHAFETZ & FOLK, 1984; TUCKER, 1990; OLIVEIRA, 2013).

Outro fator importante na formação de tufa é a precipitação biológica a partir da calcificação por indução ou influência biológica, que ocorre quando organismos microbianos (bactérias e cianobactérias) retiram o CO_2 da água para realizarem seu metabolismo, formando biofilmes capazes de atrair microcristais de CaCO_3 (EMEIS *et al.*, 1987; FORD & PEDLEY, 1996; PEDLEY, 2009; ALMEIDA, 2011).

A nucleação para formação de rochas carbonáticas pode ser física, quando há uma diferença entre a carga eletrostática dos microcristais dispersos e do substrato onde ocorrerá a nucleação, e que também pode ser desencadeado por processos biológicos (VENABLES *et al.*, 1984; CHAFETZ *et al.*, 1991; OLIVEIRA, 2009; CORRÊA, 2011), ou pode ser bioquímica, quando a aderência de partículas de CaCO_3 ocorre associada ao EPS

(exopolissacarídeos) secretado por bactérias, cianobactérias e algas (DECHO, 1990; STAL, 1995; CORRÊA, 2011), e que pode atuar tanto na nucleação bioquímica com o aprisionamento dos microcristais, ou então, na física, visto que apresenta a mesma carga eletrostática do substrato (EMEIS *et al.*, 1987; CHAFETZ *et al.*, 1991; OLIVEIRA, 2009; CORRÊA, 2011).

Após a formação da tufa, a mesma pode apresentar uma nova circulação de fluxos d'água devido a sua alta porosidade e permeabilidade, culminando em modificações diagenéticas, tais como dissolução, recristalização, cimentação, oxidação de matéria orgânica, compactação, alteração microbial (micritização) e precipitação de novos minerais. Esta alteração também é dependente do fluxo em subsuperfície, variando temporal e espacialmente, de acordo com bloqueios do fluxo por cimentação e compactação, ou criação de novos espaços vazios por dissolução e fraturamento (JONES & RENAULT, 2010).

O cimento calcítico observado em tufas pode reduzir a porosidade e a permeabilidade das mesmas, tornando-as menos friáveis e mais densas. Este cimento pode ser gravitacional, em menisco, isópaco ou em mosaico, sendo formado em condições vadasas e freáticas (JONES & RENAULT, 2010).

A alteração microbial por micritização ocorre quando cristais espáticos de calcita são transformados em micrita mediante atuação de microorganismos, frequentemente se formam laminações micríticas que podem ser confundidas com estruturas primárias, entretanto igualmente algumas dessas estruturas podem ser perdidas por neomorfismo (JONES & RENAULT, 2010).

A formação destes depósitos tufáceos ocorrem em climas variados, de semi-árido à tropical úmido (ORDOÑEZ *et al.*, 1983; CARTHEW *et al.*, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2008b; OLIVEIRA, 2009), sob diferentes litotipos, podendo ser bem cimentados e laminados até pulverulentos e maciços (OLIVEIRA, 2009). Frequentemente ocorrem intercalações de

texturas porosas e laminadas que sugerem uma alternância sazonal na deposição, de modo que o fluxo d' água varia ao longo do ano influenciando no desenvolvimento das tufas (ANDREWS & BRASIER, 2005; GRADZÍNSKI, 2010; CORRÊA, 2011), uma vez que a proliferação biológica e a deposição carbonática dependem da manutenção da temperatura média e disponibilidade hídrica elevada durante todo ano (OLIVEIRA, 2013).

4.1.3 Tipos e classificações

As tufas calcárias podem ser divididas em depósitos autóctones que são depositados *in situ*, e em depósitos alóctones (ou clásticos), que são constituídos por materiais exógenos, ou seja, provindos de outras áreas (PEDLEY, 1990; PENTECOST & VILLES, 1994).

A classificação proposta por Pedley em 1990 (Tabela 1) considera o conteúdo vegetal e as características petrográficas para distinção dos diferentes tipos de depósitos alóctones e autóctones de tufas.

Tabela 1 – Classificação de tufas calcárias (Traduzido de PEDLEY, 1990, p. 144-145).

ALÓCTONE		AUTÓCTONE	
Tufa fitoclástica		Tufa fitohermal	Framestone
Tufa cianólita oncoidal			
Tufa intraclástica			
Tufa microdetritica	Tufa micrítica		Boundstone
	Tufa peloidal		
Paleossolos tufáceos			

Os depósitos autóctones segundo Pedley (1990) poderiam ser divididos em *framestone fitohermal*, com estruturas formadas por um microfilme de cianobactérias; e *boundstone fitohermal*, com estruturas domais e laminações micríticas com esqueleto de poucos

centímetros, que muito se assemelhariam as estruturas encontradas em estromatólitos (ALMEIDA, 2011). Esta última corresponderia a tufa fitohermal do tipo estromatolítica, classificada por Ford & Pedley (1996).

Os depósitos alóctones poderiam ser divididos em *fitoclásticos*, com restos de vegetais e galhos cimentados, com frequentes moldes e vestígios dos mesmos preservados; *cianólitos oncoidais*, com estruturas do tipo estromatolítica elipsoidal; *intraclásticos*, que seria caracterizada por depósitos com arcabouço intensamente retrabalhado; e *microdetriticos*, que representaria finos depósitos de micrito, sendo formado principalmente, em pântanos e lagos.

A classificação proposta por Ford & Pedley em 1996 (Tabela 2) considera a textura da tufa, integrando o ambiente de formação, as definições petrográficas e sedimentológicas e as inclusões biogênicas da mesma (OLIVEIRA, 2013). Além disso, ela considera as classificações anteriores, propostas por Dunham (1962) (Tabela 3), Embry e Klovan (1971) (Tabela 4), para as rochas carbonáticas, e a de Pedley (1990), descrita anteriormente.

Desta forma, Ford & Pedley (1996) formularam uma classificação geral para o estudo deste tipo de carbonato continental, que é passível de aplicação em qualquer depósito, sendo assim, a classificação mais utilizada nos últimos anos no estudo de tufas.

Tabela 2 – Classificação de tufas calcárias (Traduzido de FORD & PEDLEY, 1996, p.130).

ALÓCTONE		AUTÓCTONE
Tufa microdetritica	Tufa macrodetritica	
Matriz suportada	Clasto suportada	
Tufa micrítica	Tufa oncoidal e cianólita	
Tufa peloidal	Tufa intraclástica	
Tufa sapropelítica (rica em restos orgânicos)	Tufa fitoclástica	
Tufa litoclástica (rica em restos inorgânicos)	Tufa litoclástica	
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Grainstone ou Packstone</i>
		<i>Boundstone</i>

Tabela 3 – Classificação de carbonatos (Traduzido de DUNHAM, 1962).

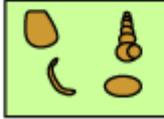
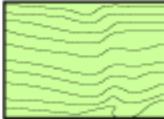
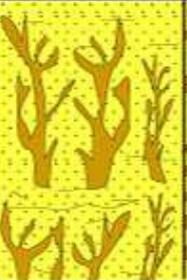
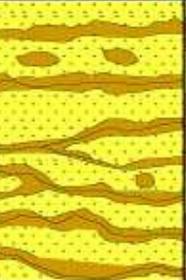
Os componentes do calcário estavam soltos durante a deposição				Os componentes do calcário já cresceram interligados (edifício bioconstruído ou bioinduzido)
Contém lama		Não contém lama		
Sustentando pela lama		Sustentando pelos grãos		
Possui menos de 10% de grãos	Possui mais de 10% de grãos			
Mudstone 	Wackestone 	Packstone 	Grainstone 	Boundstone 

Tabela 4 – Classificação de carbonatos (Traduzido de EMBRY & KLOVAN, 1971).

ALÓCTONE		AUTÓCTONE		
Os componentes originais não foram depositados organicamente		Os componentes originais foram organicamente formados		
> 10% dos grãos > 2 mm				
Matriz suportado	Suportado por grãos > 2 mm	por organismos que formam ramificações	por organismos que encrustam e aprisionam partículas	por organismos que constroem edifício rígido
Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone
				

As tufas *autóctones fitohermais* seriam aquelas que apresentam *fabric* altamente porosa e permeável, e tipicamente, restos de fungos, macrófitas, diatomáceas e cianobactérias, com uma porosidade formada a partir de moldes destes organismos que por vezes, possuem um preenchimento micrítico posterior. Dentro deste contexto, as *fitohermais do tipo estromatolítica* seriam aquelas que apresentam fácies dominadas por estromatólitos de até 1 metro de diâmetro, com frequentes estruturas domais, e que geralmente estão associadas às cianobactérias do gênero *Oscillatoria* (PEDLEY, 1990; FORD & PEDLEY, 1996; CORRÊA, 2011).

Dentro das *macrodetriticas*, as *fitoclásticas* seriam aquelas formadas a partir de galhos e folhas, os quais constituem o principal arcabouço da rocha, e que ocorrem frequentemente sob a forma de moldes. A *oncoidal* e a *cianólita* são compostas por oncólitos esféricos a subsféricos com núcleos variados, formados por fragmentos de madeira, gastrópodes, grãos de quartzo, etc. As *litoclásticas* são as que possuem arcabouço formado por restos inorgânicos, e as *intraclásticas* constituiriam as que detêm sedimentos, variando o tamanho granulométrico de argila a areia fina, associados com fragmentos de tufas anteriormente originados (PEDLEY, 1990; FORD & PEDLEY, 1996; CORRÊA, 2011).

Já as tufas *microdetriticas* são sustentadas exclusivamente pela matriz, e estão divididas entre as *sapropelíticas* que são formadas por pequenas partículas de restos orgânicos transportados, as *micríticas* que apresentam uma densa camada micrítica, e que cuja origem estaria associada à precipitação de calcita extracelular durante a fotossíntese. As *peloidais* seriam aquelas sustentadas por grãos do tipo peloidal, que estão agrupados em massas polinucleadas, com tamanho inferior a 0,07 mm. As *microdetriticas litoclásticas*, assim como as *macrodetriticas litoclásticas*, são formadas por restos inorgânicos, porém de tamanho microscópico, e são obrigatoriamente matriz suportadas (PEDLEY, 1990; FORD & PEDLEY, 1996; CORRÊA, 2011).

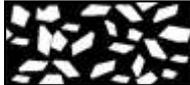
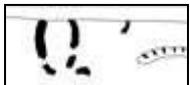
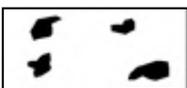
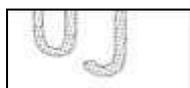
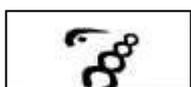
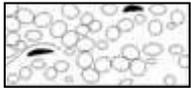
Para classificação do ambiente deposicional de depósitos tufáceos, Corrêa (2011) propôs um modelo dos ambientes formadores de tufas, a partir de uma adaptação de classificações anteriores, propostas por Pedley (1990), Ford & Pedley (1996) e Carthew (2003a), no qual são distinguidos quatro tipos de ambientes deposicionais: fluvial, palustre, lacustre e de vertente ou nascente suspensa, além de seus subambientes, a partir de suas características e litofácies.

Tabela 5 – Modelo de ambiente deposicional de tufas adaptado de Pedley (1990), Ford & Pedley (1996) e Carthew (2003a) (Traduzido de CORRÊA, 2011, p.34).

AMBIENTE DEPOSICIONAL	SUBAMBIENTE	CARACTERÍSTICAS E LITOFÁCIES
Vertente ou nascente suspensa	Proximal	Depósitos lobulados, com superfície convexa ou achatada, que se desenvolvem a partir de ressurgências de águas subterrâneas. Cortinas de musgos (tufas fitohermais) que recobrem a cachoeira são responsáveis pela precipitação de carbonato. Cavernas podem ser formadas atrás da cortina de tufa e estalactites podem crescer no local. Nas áreas mais íngremes, onde a água flui rapidamente, encontram-se terraços de travertino. Os depósitos próximos às fontes podem tornar-se sub-horizontais e formar poças que apresentarão fácies semelhantes às formadas em ambientes palustres como as estromatolíticas. Podem conter tufas fitoclásticas.
	Distal	Depósitos quase horizontais formados por tufas intraclásticas detríticas com raras lentes de fitoclastos associadas ao local. Níveis de paleossolos são comuns.
Fluvial	Barragem	Desenvolvida normalmente em passagens estreitas a partir do represamento da água corrente por uma série de barragens de tufas fitohermais formadas a jusante do rio. À montante encontram-se tufas micríticas associadas a pequenas porções de tufas fitohermais.
	Entrelaçado	Tufa cianólita oncoidal associada a lentes de tufas fitoclásticas marginais e a tufas microdetríticas com desenvolvimento de estromatólitos assimétricos ao leito do rio.
Lacustre		Associadas a extensos e lenticulares corpos d'água, onde na margem desenvolvem-se tufas fitohermais e estromatolíticas. Em lugares de profundidade menor que 5 m é comum se encontrar algas do gênero <i>Chara</i> . Todo o fundo do lago é coberto por tufa microdetrítica que pode estar associada com os produtos das florações sazonais de algas.
Palustre		Desenvolvidas em encostas pouco drenadas (pantanosas). É comum a incrustação de macrófitas gerando tufas fitohermais. Tufas microdetríticas podem ser formadas localmente nos poços (micrítica, peloidal, sapropelítica e litoclástica).

Para classificação da porosidade encontrada em tufas calcárias, o presente trabalho considera a classificação da porosidade de carbonatos proposta por Choquete & Pray em 1970, na qual os autores as dividem em porosidade de trama seletiva, quando os poros são definidos pela trama dos elementos da rocha; porosidade de trama não seletiva, quando os poros não estão definidos pela trama dos elementos da rocha; e porosidade de trama seletiva ou não seletiva, quando os poros estão definidos ou não pela trama dos elementos da rocha (Tabela 6).

Tabela 6 – Classificação de porosidade de carbonatos (Traduzido de CHOQUETE & PRAY, 1970).

TRAMA SELETIVA		TRAMA NÃO SELETIVA		TRAMA SELETIVA OU NÃO SELETIVA	
	Intergranular		Fratura		Brecha
	Intragranular		Canal		Perfuração
	Intercristalina		Vugular		Toca
	Móldica		Caverna		Contração
	Fenestral		Estilolítica		
	<i>Shelter "abrigo"</i>				
	<i>Framework "quadro"</i>				

4.1.4 Depósitos tufáceos da Serra do Cândido

Ao longo da Serra do Cândido são encontrados depósitos ativos e inativos de tufas calcárias em diferentes escalas, como ilustrado pela Figura 10, além disso, em destaque na imagem estão enumerados os depósitos que já foram caracterizados e classificados anteriormente por Corrêa (2011): (1) Dezoito de Março, (2) Caxangá I, (3) Caxangá II, (4) Mirindiba, (5) Boi Morto. As tufas estudadas por esta autora encontram-se distribuídas ao longo das vertentes noroeste e sudeste da serra entre as latitudes $21^{\circ}49'30''\text{S}$ / $21^{\circ}25'27''\text{S}$ e as longitudes $42^{\circ}13'12''\text{W}$ / $42^{\circ}08'15''\text{W}$ (Tabela 7) (CORRÊA, 2011).

Os demais depósitos que não se encontram enumerados, ainda precisam ser classificados e melhor estudados. Ademais, acredita-se que existam outros depósitos tufáceos ainda não identificados na serra, que provavelmente ocorrem ao longo de todas as suas drenagens, visto as condições favoráveis ao desenvolvimento destes carbonatos continentais. Sendo assim, a Serra do Cândido carece de um mapeamento geológico detalhado no que se refere às tufas.

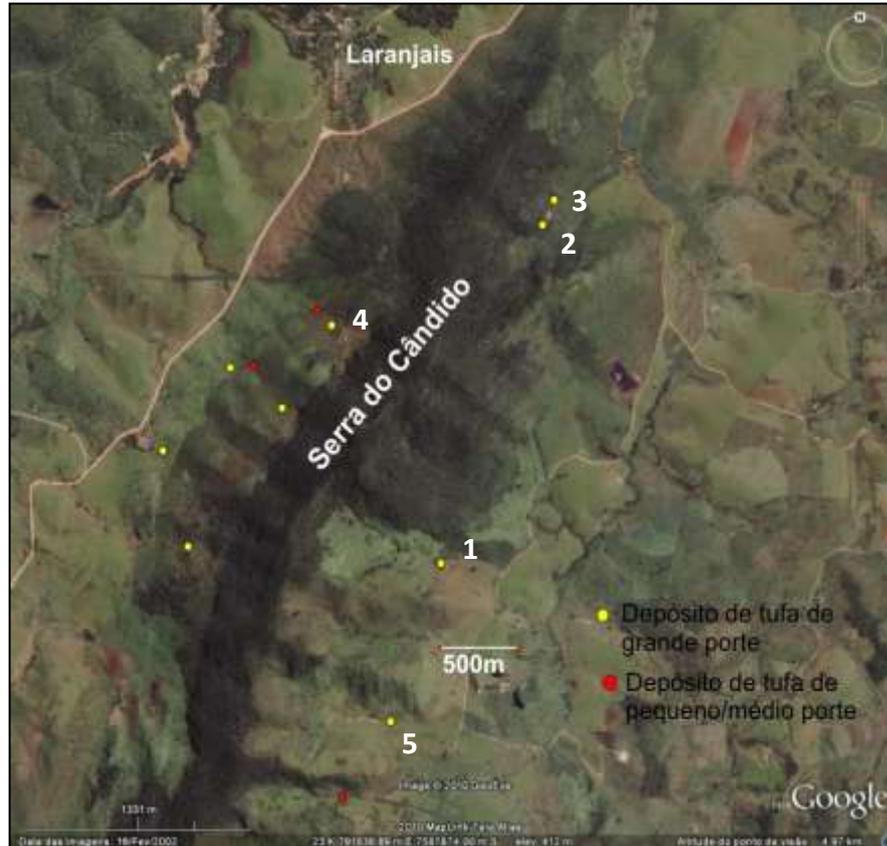


Figura 10 – Depósitos tufáceos da Serra do Cândido, em destaque os depósitos estudados por Corrêa (2001): (1) Dezoito de Março, (2) Caxangá I, (3) Caxangá II, (4) Mirindiba, (5) Boi Morto. Modificado de *Google Earth* em setembro de 2013.

Tabela 7 - Localização dos pontos em UTM, utilizando o *Datum* WGS 1984, Zona 23S (CORREÂ, 2011).

Nome do depósito	UTM E	UTM N
Caxangá	792594	7589263
Mirindiba	791117	7588501
Boi Morto	791338	7586241
Dezoito de Março	791562	7587158

As tufas ao longo da serra ocorrem sob a forma de barragens, cachoeiras e pequenas cavidades, formadas *in situ*, ou, como represas de tufas que se formam a jusante das mesmas,

com diversas formas de recobrimento calcário de origem tufácea, tais como folhas, galhos, troncos de árvores e talos de algas, que se encontram revestidos por carbonato de cálcio.

O depósito denominado Caxangá I é caracterizado por formar um abrigo-sob-rocha (CORREÂ, 2011), típico modelo de nascentes suspensas (ou tufa de vertente) (PEDLEY, 1990; FORD & PEDLEY, 1996; CARTHEW, 2003a, CORRÊA, 2011). Dentro do abrigo formaram-se espeleotemas por gotejamento (estalactites, estalagmites e colunas) e por escorrimento (cortinas e *microgours*), e o pavimento é formado principalmente por tufa com estruturas estromatolíticas (CORRÊA, 2011) (Figura 11).

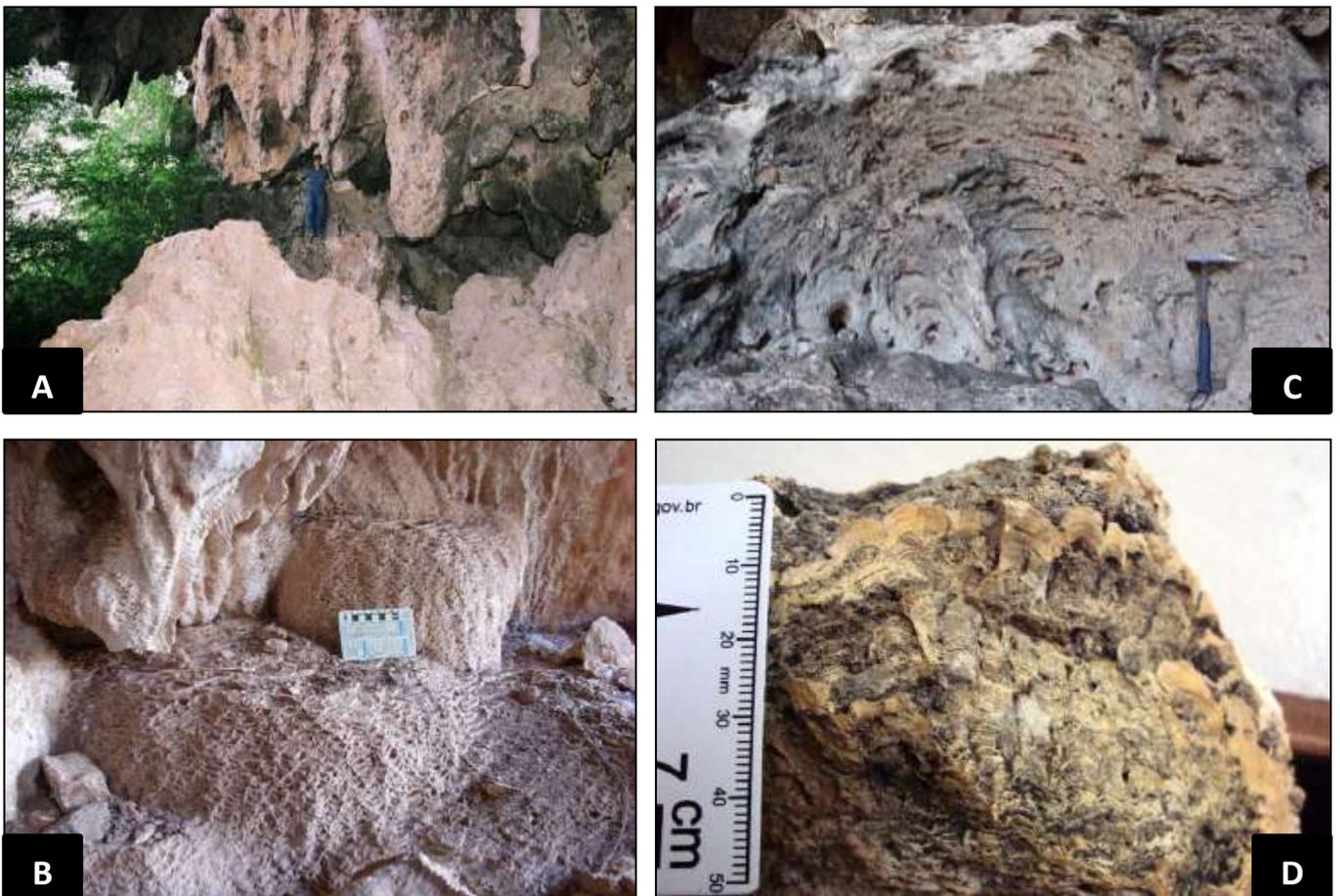


Figura 11 – (A) Foto do interior do abrigo-sob-rocha Caxangá I (Fonte: NICOLA, 2006); (B) espeleotema do tipo cortina e *gours* no interior do abrigo (Fonte: CORRÊA, 2011); (C) estruturas semelhantes à biohermas no pavimento do abrigo (Fonte: CORRÊA, 2011); (D) amostra com laminações onduladas formando estruturas domais semelhantes às estruturas encontradas em estromatólitos (CORRÊA, 2011).

Corrêa (2011) acredita que o depósito Caxangá II formou um abrigo-sob-rocha semelhante ao seu depósito homônimo, entretanto, atualmente este teria sido erodido e intemperizado de tal modo que não se preservou sua morfologia inicial, mas sua gênese também estaria relacionada a uma típica de tufa de vertente, como a descrita por Pedley (1990) (Figura 12).

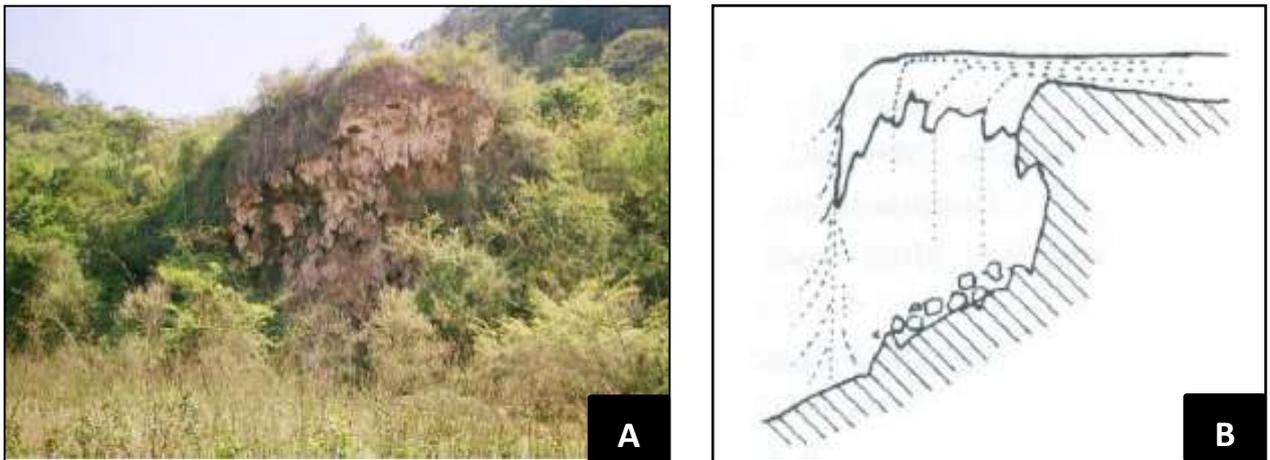


Figura 12 – (A) Vista frontal de Caxangá II (CORRÊA, 2011); (B) modelo de tufa de vertente de Pedley (1990).

O depósito tufáceo denominado Mirindiba apresenta tufas ativas e inativas, e como o Caxangá II, por processos erosivos e intempéricos, não forma atualmente um abrigo-sob-rocha, mas também se encaixaria no modelo de tufa de vertente de Pedley (1990) (Figura 13). Representa o único depósito de tufa da parte noroeste da serra que se encontra classificado e caracterizado (CORRÊA, 2011).



Figura 13 – (A) Vista lateral de Mirindiba; (B) Foto da base do depósito com moldes de raízes e estruturas estromatolíticas (CORRÊA, 2011).

O depósito denominado Boi Morto representa a maior tufa de vertente da região, com aproximadamente 15 metros de altura (Figura 14). Este representa uma grande tufa em cascata, onde evoluiu um abrigo-sob-rocha com espeleotemas do tipo estalactite.



Figura 14 – Panorama frontal do depósito Boi Morto, que representa a maior tufa de vertente já descoberta na Serra do Cândido. Foto de outubro de 2013.

O depósito Dezoito de Março, situado na vertente sudeste da Serra do Cândido, constitui-se de diversos depósitos de tufa ativos e inativos, situados próximo ao leito atual da drenagem, associado às nascentes cársticas e compreendidos em um trecho de cerca de 250 metros, sendo o maior e mais exuberante depósito tufáceo registrado na Serra do Cândido (Figura 15). É possível observar no local os processos deposicionais atuais, formadores das distintas litofácies, que podem ser associados aos antigos depósitos espalhados por toda a área (CORRÊA, 2011), uns dos motivos pelo qual este depósito foi escolhido para ser estudado no presente trabalho.

O depósito se desenvolve ao longo da encosta, a partir de degraus formados por quebras do relevo, no qual se desenvolvem tufas em cascata. A frente destas formam-se pequenas represas em porções de relevo mais plano e de com fluxos aquosos de menor energia. Estas

represas, por sua vez, são menos expressivas e por vezes se desenvolvem a partir de biofilmes ricos em microorganismos que contribuem com a precipitação carbonática.



Figura 15 – (A) Visão panorâmica, foto de janeiro de 2014; e (B) vista frontal do depósito Dezoito de Março, foto de outubro de 2013; (C) primeira tufa observada no sopé da serra, com tufa em cascata, e a jusante uma pequena represa com forma convexa contendo colônias algálicas, foto de outubro de 2012.

Os depósitos tufáceos estudados ao longo da Serra do Cândido por Corrêa (2011) formam exuberantes tufas de vertente ou nascente suspensa, segundo a própria autora que assim as definem, em acordo com a sua classificação proposta em conjunto com trabalhos anteriores de Pedley (1990), Ford & Pedley (1996) e Carthew (2003a) para os diferentes tipos tufas e seus possíveis ambientes de formação (Tabela 5).

4.2 Hidrogeoquímica

A caracterização hidrogeoquímica se baseia em parâmetros medidos e derivados. Os parâmetros medidos são aqueles obtidos diretamente por técnicas analíticas em campo ou laboratório, como o pH, temperatura, condutividade elétrica e teores de cátions e ânions dissolvidos. Já os parâmetros derivados são aqueles calculados a partir de parâmetros medidos, através de cálculos matemáticos realizados em programa computacionais específicos, como o índice de saturação (IS), razão molar Mg/Ca, dureza total e balanço iônico (ALMEIDA, 2011).

O índice de saturação (IS) reflete a capacidade de dissolução de uma solução, que desvia do seu estado de equilíbrio, em relação a um mineral. Segundo Merkel *et al.*, 2008, valores de IC acima de +0,05 indicam uma solução supersaturada em dado mineral, mas não indica a precipitação do mesmo.

Quando $ISc = 0$ e que a água está em perfeito equilíbrio com o mineral carbonático em solução, ou seja, a solução está saturada e não ocorre dissolução e nem precipitação de carbonato. Quando os valores de $ISc > 0$ (positivos), as soluções são supersaturadas e ocorre a precipitação da fase sólida para os íons dissolvidos, ou seja, está ocorrendo a precipitação de calcita. Enquanto que valores de $ISc < 0$ (negativos), indicam que as águas estão insaturadas em relação aos minerais carbonáticos, ou seja, continua o processo de dissolução (LANGMUIR, 1971).

Já a razão molar Mg/Ca é um dos principais parâmetros utilizados na comparação de águas em estudos hidroquímicos, pois é um dos principais fatores condicionantes a precipitação de calcita e/ou aragonita. Ela é obtida pelo quociente entre as concentrações molares (mol/L) de Mg e Ca de cada amostra (ALMEIDA, 2011). Com uma temperatura igual ou superior a 20 °C, se a razão molar Mg/Ca for menor que 1,45, somente ocorre

precipitação de calcita (LIPPMAN, 1960). Entretanto, há temperatura igual ou inferior a 10 °C com pH igual a 7, e razão molar Mg/Ca próximo a 0,4, a aragonita começa a se depositar (FILIPOV, 1990).

A dureza total (DT) é definida como o somatório das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} que estão dissolvidos na amostra. Grande parte dos estudos geoquímicos de águas cársticas expressa a dureza total em mg/L equivalente a CaCO_3 , ou seja, quantos mg/L de calcita correspondem a soma das concentrações de cálcio e magnésio da amostra (WHITE, 1988). Para o cálculo da dureza total das águas amostradas é utilizado à expressão a seguir:

$$DT_{(\text{mg/L})} = [\text{Ca}^{2+}] \times 2,49 + [\text{Mg}^{2+}] \times 4,12$$

Onde:

$DT_{(\text{mg/L})}$ = Dureza total da água amostrada em mg/L.

$[\text{Ca}^{2+}]$ e $[\text{Mg}^{2+}]$ = Concentrações em mg/L de Ca^{2+} e Mg^{2+} dissolvidos medidas nas amostras, respectivamente.

2,49 e 4,12 = Fatores de conversão das concentrações equivalentes de CaCO_3 em mg/L para Ca^{2+} e Mg^{2+} , respectivamente.

O balanço iônico ou eletroneutralidade (EN) é medido em % e reflete o erro do cálculo e, conseqüentemente possíveis erros nas medidas e/ou análises. Valores de $EN < 0$ (negativos) significam que há excesso de ânions, enquanto que valores de $EN > 0$ (positivos) indicam que há excesso de cátions. Para que o cálculo do índice de saturação (IS) seja aceito, o erro do balanço iônico deve ser abaixo de 10% (ALMEIDA, 2011).

A alcalinidade de uma solução é definida como a capacidade dos solutos reagirem, neutralizando um ácido. Ela pode ser obtida por titulação, quando o pH final será obtido em função do tipo de soluto que está em solução. Segundo Hem (1985) a maioria das águas

naturais apresenta alcalinidade produzida por dióxido de carbono (CO_2) e os ânions bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}) dissolvidos.

5. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi estruturada em três grandes etapas, assim definida: (1) revisão bibliográfica, (2) trabalhos de campo e (3) análises laboratoriais.

5.1 Revisão bibliográfica

A pesquisa foi atualizada e revisada durante todo desenvolvimento do trabalho, foram selecionados artigos, trabalhos e dissertações que abordassem o estudo de carbonatos continentais, tufas e travertinos, bem como, temas que debatessem a influência biológica, climática e hidrogeoquímica na gênese de carbonatos continentais. Além disso, foram pesquisados assuntos relacionados às características fisiográficas e ao contexto geológico evolutivo da região Centro-Norte Fluminense, em que se encontra inserida a área de estudo.

Algumas das informações buscadas na literatura dizem respeito às técnicas empregadas em análises de tufas, como os procedimentos de amostragem, determinação de relações estratigráficas, significado dos aspectos morfológicos dos depósitos, identificações petrográficas e aspectos mineralógicos.

Com uma análise preliminar dos dados retirados da literatura, foi possível planejar a etapa de campo e definir o material que seria encaminhado às análises laboratoriais. Com a síntese das informações obtidas, foi realizada a fundamentação teórica e a discussão dos resultados obtidos.

A padronização das citações e referências bibliográficas seguiram as regras propostas pela Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT).

5.2 Trabalhos de campo

Desde o início do estudo, a partir da Iniciação Científica em 2012, foram realizadas etapas de campo em maio de 2012, outubro de 2012, abril de 2013, outubro de 2013 e janeiro de 2014, totalizando seis dias de campo, durante os quais foram coletadas amostras de tufas inativas para petrografia, e águas da drenagem principal, para a sua caracterização hidroquímica.

Durante o campo foi realizado um estudo sedimentológico e estratigráfico do depósito Dezoito de Março, que consistiu na descrição das características macroscópicas dos depósitos tufáceos, com distinção das diferentes fácies sedimentares, devidamente fotografadas, e com a elaboração de uma seção geológica, a partir de visadas, acompanhando o curso da drenagem principal, e observando a área adjacente, onde na maioria das vezes encontravam-se os maiores depósitos de tufas em cascata.

As tufas do depósito Dezoito de Março são conhecidas por trabalhos anteriores (RAMOS *et al.*, 2005; CORRÊA, 2011) entretanto, também foi realizado um reconhecimento em campo nas adjacências da drenagem principal, que condiciona o desenvolvimento do depósito, na tentativa de reconhecer novas ocorrências de tufas, antes não observadas.

5.2.1 Coleta de amostras

A coleta de amostras visou à amostragem das distintas litofácies e de tufas derivadas de diferentes níveis estratigráficos ao longo do depósito. A catalogação das amostras foi feita da seguinte maneira, primeiramente as amostras foram coletadas e numeradas, e em seguida, etiquetadas e, na maioria das vezes, orientadas.

Durante a coleta foi realizada uma descrição e interpretação estratigráfica da amostra em relação ao depósito na qual se inseria na caderneta de campo, para compreender a origem das distintas macrofácies. De modo que a relação de uma amostra com o depósito no qual ela se insere e com o contexto geral, mostrou-se extremamente difícil, visto que em uma amostra de mão se era possível à identificação de distintas litofácies. Além disso, as diferentes litofácies estão distribuídas ao longo de todo o depósito Dezoito de Março, não havendo uma sucessão de empilhamento estratigráfico.

Algumas amostras de tufas foram encaminhadas para confecção de secções delgadas, enquanto que outras apenas foram fotografadas para identificação de suas características macroscópicas.

A coleta e análise de águas requereu mais atenção com a finalidade de minimizar possíveis erros analíticos. As soluções foram preparadas e padronizadas segundo Hypolito *et al.* (2008), para que se fosse possível preservar as amostras e realizar a titulação em campo.

Como um dos objetivos da coleta é analisar o conteúdo de cátions e ânions dissolvidos na água, deve-se evitar a precipitação de algum possível mineral dentro do frasco e o escape de gases, para isto, a coleta deve ser realizada a uma profundidade de aproximadamente 20 cm, e após a coleta a água presente no frasco não pode apresentar bolhas, além disso, deve-se adicionar ácido nítrico (HNO_3) concentrado no frasco de cátions, para evitar a precipitação de calcita e/ou a perda de íons cálcio (Ca^{+2}), e manter a amostra refrigerada imediatamente após a sua coleta (Hypolito *et al.*, 2008), para refrigeração foi-se utilizado um cooler com gelo (Figura 16) e o ácido nítrico foi cedido pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio (LABAGUAS), assim como todo o restante do material necessário para a coleta de água e titulação em campo.



Figura 16 – Cooler utilizado para refrigeração das amostras em campo. Foto de outubro de 2013.

Foram feitas coletas de água na base e no topo do depósito, nas idas a campo em outubro de 2013 e janeiro de 2014, totalizando ao todo quatro amostragens de água. Em cada ponto foi coletado a mesma água em três frascos distintos, um para titulação, outro para análise de ânions e o último, onde foi adicionado duas gotas de ácido nítrico (HNO_3) concentrado, para análise de cátions. Neste último a água foi filtrada com um filtro de celulose com porosidade de $0,45 \mu\text{m}$, com o auxílio de uma seringa a vácuo, para evitar que possíveis partículas presentes na água se dissolvessem com a adição do ácido, interferindo no resultado da análise laboratorial.

Os frascos devem estar limpos e descontaminados, para isto, foram banhados em solução de ácido nítrico diluído durante um dia, e depois, foram lavados com água destilada e levados para secadora. Todos os frascos permaneceram refrigerados desde a sua coleta em campo até o transporte ao Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio (LABAGUAS), onde foram realizadas as análises. Ressalta-se que a coleta de água foi realizada ao final da atividade de campo, pois facilita o processo de refrigeração dos frascos

minimizando possíveis erros, visto que os mesmos foram transportados sob refrigeração até o laboratório por um percurso de aproximadamente quatro horas de carro.

Antes do armazenamento da água foram medidos em campo os valores de pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e o potencial de oxirredução - ORP (mV) da mesma, com os equipamentos *Hanna HI 98128*, *Hanna HI 98311* e *Hanna HI 98121*, respectivamente, e que foram cedidos pelo Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ (Figura 17). A água utilizada para estas medidas não foi filtrada, sendo descartada posteriormente. A temperatura ($^{\circ}\text{C}$) da água foi medida juntamente com os outros valores, em todos os aparelhos.



Figura 17 – (A) Coleta das amostras com o frasco em destaque; (B) filtragem das águas amostradas com um filtro de celulose com porosidade de $0,45 \mu\text{m}$, com o auxílio de uma seringa a vácuo; (C) Medição em campo do pH com o aparelho *Hanna HI 98128*. Fotos de janeiro de 2014.

Ainda em campo, realizou-se o teste de alcalinidade ou titulação, que permite estimar a concentração de HCO_3^- em mg/L da água, este teste também foi realizado no laboratório, e os seus respectivos resultados são descritos no item 6.4.

5.2.2 Titulação

No mesmo dia da coleta de água foi realizado o teste de alcalinidade, ou titulação, em campo, seguindo os procedimentos propostos por Hypolito *et al.* (2008). Para isto, foram necessários os seguintes materiais: ácido sulfúrico (H_2SO_4) padronizado a 0,1 N, indicador alaranjado de metila e bureta eletrônica, todos cedidos pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio (LABAGUAS).

A análise consistiu em verificar o volume de ácido sulfúrico padronizado necessário para que a amostra de água alcance o pH igual a 4,5 e foi-se utilizado um dos frascos coletados em cada ponto, enquanto que os demais permaneceram fechado para conferência dos resultados em uma nova titulação em laboratório.

Todo material necessário para titulação foi levado ao campo, entretanto, por questões de logística preferiu-se realizar o teste no hotel logo após a etapa de campo, visto que o curto tempo de armazenamento, já que a coleta ocorreu no final do campo, e a refrigeração logo após a coleta, não deixaram com que o resultado final sofresse algum erro analítico significativo.

O processo se tem início com a adição de um indicador alaranjado de metila em um determinado volume de amostra (no caso 20 ml), formando uma solução de cor amarelada. Depois, mede-se o volume de ácido sulfúrico padronizado que está sendo adicionado a solução, cujo valor é verificado na bureta eletrônica. À medida que o mesmo é adicionado, o pH da solução decresce e a sua coloração que antes era amarelada passa gradualmente a

possuir uma cor alaranjada e avermelhada. Quando a solução estiver com uma cor vermelha, sabe-se que o pH atingiu o valor de 4,5 (Figura 18), e verifica-se o volume do ácido (H_2SO_4) adicionado, na bureta eletrônica.



Figura 18 – (A) Início da titulação com 20 ml de amostra de água coletada com a adição do indicador misto, percebe-se a coloração amarelada; (B) fim da titulação, com a amostra já com a cor avermelhada, indicando que o pH atingiu o valor de 4,5. O aparelho utilizado tanto para adicionar quanto medir o ácido (H_2SO_4) chama-se bureta eletrônica.

Após, utiliza-se a Equação I para calcular o teor de ânions de HCO_3^- , ou seja, a alcalinidade total da amostra.

$$\text{Equação I: } \text{HCO}_3^- \text{ (mg/L)} = (V_{\text{ácido (ml)}} \times 0,01 \times f \times 2 \times 61) / (V_{\text{amostra (L)}})$$

$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/L)}$ = teor de ânions de HCO_3^- da amostra.

$V_{\text{ácido (ml)}}$ = volume de H_2SO_4 utilizado em mililitros.

$f = 1,1$ (depende da concentração do ácido, valor fornecido pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio).

$V_{\text{amostra (L)}}$ = volume da amostra pré-determinado com uma proveta, em litros.

5.3 Análises laboratoriais

5.3.1 Petrografia

Durante as etapas de campo foram coletadas amostras de tufas inativas para descrição macroscópica com auxílio de uma lupa de mão, e microscópica, a partir da confecção de lâminas delgadas das amostras, com descrição e aquisição de imagens digitais de alta definição no microscópio petrográfico *Zeiss Axio Imager M2m*, com auxílio do programa *Axiovision Microscopy Software*, do Laboratório de Geologia Sedimentar da UFRJ (LAGESED).

As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do IGEO/UFRJ e antes de serradas as amostras foram impregnadas com resina devido ao fato das tufas serem friáveis. Foram feitas e descritas ao todo 17 lâminas petrográficas de 13 amostras distintas (Tabela 8). Fez-se necessário a confecção de mais de uma lâmina em uma mesma amostra devido à riqueza de informações observadas macroscopicamente.

Tabela 8 – Identificação das amostras de mão e a(s) sua(s) respectiva(s) lâmina(s) confeccionada(s).

Amostra	Lâmina (s)	Amostra	Lâmina (s)
DM 1C	DM 1C (A) / DM 1C (B)	MN 173 RS	MN 173 RS
DM 2C	DM 2C (A) / DM 2C (B)	MN 178 RS	MN 178 RS
DM 2D	DM 2D	MN 185 RS	MN 185 RS
DM 2E	DM 2E (A) / DM 2E (B)	TH 1	TH 1 (A) / TH 1 (B)
DM 3	DM 3	TH 2	TH 2
MN 168 RS	MN 168 RS	TH 3	TH 3
MN 169 RS	MN 169 RS		

Para classificação das microfácies foram utilizadas as classificações de Dunham (1962) (Tabela 3), Embry & Klovan (1971) (Tabela 4), Pedley (1990) (Tabela 1) e Ford & Pedley (1996) (Tabela 2). A avaliação da mineralogia, constituintes terrígenos, porosidade e a identificação dos microorganismos auxiliaram a classificação das tufas e a sua interpretação genética.

5.3.2 Hidroquímica

As amostras de água coletadas em campo foram enviadas para o Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio (LABAGUAS), onde foram analisadas as concentrações de cátions e ânions por cromatografia iônica (IC).

Com os resultados obtidos, foi feita a compilação dos dados hidroquímicos das águas para o cálculo de parâmetros derivados, como índice de saturação, balanço iônico e dureza total em CaCO_3 , a partir dos parâmetros medidos em campo e laboratório (teores de cátions e ânions, pH, temperatura, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido). Para isto, utilizaram-se os programas computacionais *Microsoft Excel 2010*, *PHREEQC Interactive v.3.0.6* e *AquaChem v.5.1*, disponíveis no Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ, que realizaram a plotagem de dados hidroquímicos em gráficos e diagramas, os mesmos encontram-se explicitados no item 6.4.

6. RESULTADOS

6.1 Contexto geológico e geomorfológico

Para a compreensão do contexto geológico e geomorfológico que envolve a formação dos depósitos tufáceos, foi confeccionada uma seção topográfica e geológica para a área (Figura 19).

Foram identificadas e medidas nove fraturas (juntas) no mármore, que apresentaram um padrão com mergulhos suaves para ESE. Apenas duas dessas juntas, X e Y, encontram-se representadas na seção e as suas atitudes foram de $142^{\circ}/24^{\circ}$ e $110^{\circ}/25^{\circ}$ (*dip direction*), respectivamente. Em relação à foliação metamórfica do mármore, em virtude do aspecto maciço da rocha, apenas uma medida foi obtida, qual seja $123^{\circ}/80^{\circ}$.

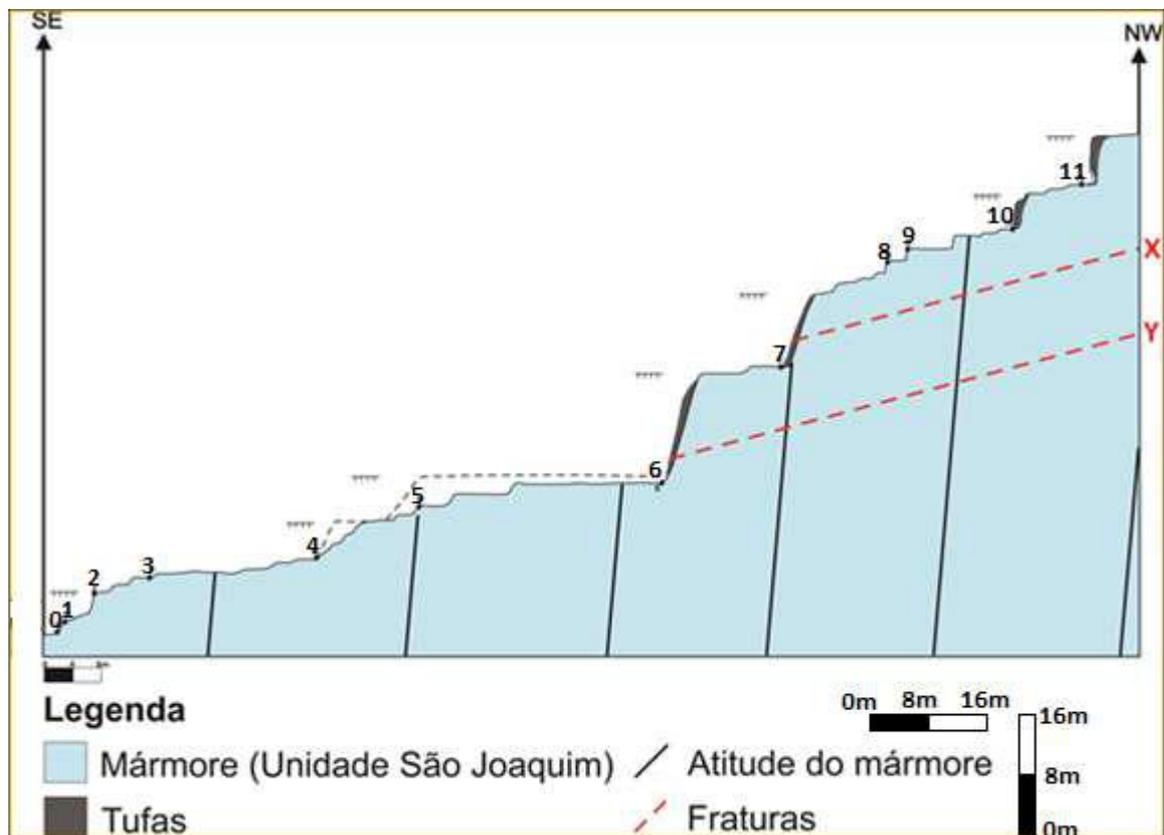


Figura 19 – Seção topográfica e geológica do depósito Dezoito de Março, com doze dos pontos estudados ao longo da área.

A partir dos estudos realizados em campo e como ilustrado na seção acima, observa-se que os maiores depósitos de tufa calcária encontram-se relacionados às áreas com surgências de água através de fraturas, que ao percolarem através do mármore, tornam-se supersaturada em bicarbonato de cálcio, auxiliando a precipitação química destes carbonatos com a perda de CO_2 .

Nos períodos de baixa pluviosidade, onde a taxa de recarga da drenagem é pequena, a contribuição de água de subsuperfície torna-se a principal responsável pela precipitação destes carbonatos continentais, como visto na Figura 19. Nestes períodos, no topo do depósito Dezoito de Março, a drenagem encontrava-se seca e, em contrapartida, na base da serra há a formação de tufas através de precipitação carbonática a partir de surgências em fraturas.



Figura 20 – Depósito de tufa em cascata com aproximadamente 8 m de altura, próximo à base da serra, obtida em maio de 2012. Observa-se que a predominância do fluxo a partir de uma surgência em fratura. A drenagem superficial encontrava-se praticamente seca.

Percebe-se também que os maiores depósitos estão relacionados às regiões com maiores desníveis topográficos, ou seja, nas maiores escarpas, pois nestas áreas a água flui com maior turbulência, favorecendo o escape de CO_2 e a precipitação química de CaCO_3 .

Além disso, como visto na Figura 21, o depósito Dezoito de Março encontra-se sombreado por uma densa vegetação, que provavelmente propiciam locais adequados para o desenvolvimento de tufas a partir da precipitação de CaCO_3 em galhos, folhas, raízes etc. A vegetação densa talvez favoreça a proliferação de cianobactérias, devido a maior umidade, favorecendo uma precipitação bioinduzida por estes microorganismos.



Figura 21 – Imagem do satélite *Google Earth* de 21 de dezembro de 2014, com destaque para o depósito Dezoito de Março e a sua densa vegetação associada.

6.2 Classificação dos depósitos

6.2.1 Depósitos ativos

Estes depósitos são assim chamados por ainda estar ocorrendo a precipitação de CaCO_3 , à água flui por cascatas de tufas formadas a partir de raízes pendentes e macrófitas autóctones e a frente destas cascatas, desenvolvem-se represas com formas arredondadas, onde ocorre a precipitação carbonática em torno de galhos, folhas, sedimentos, etc., transportados junto a drenagem (Figura 22).

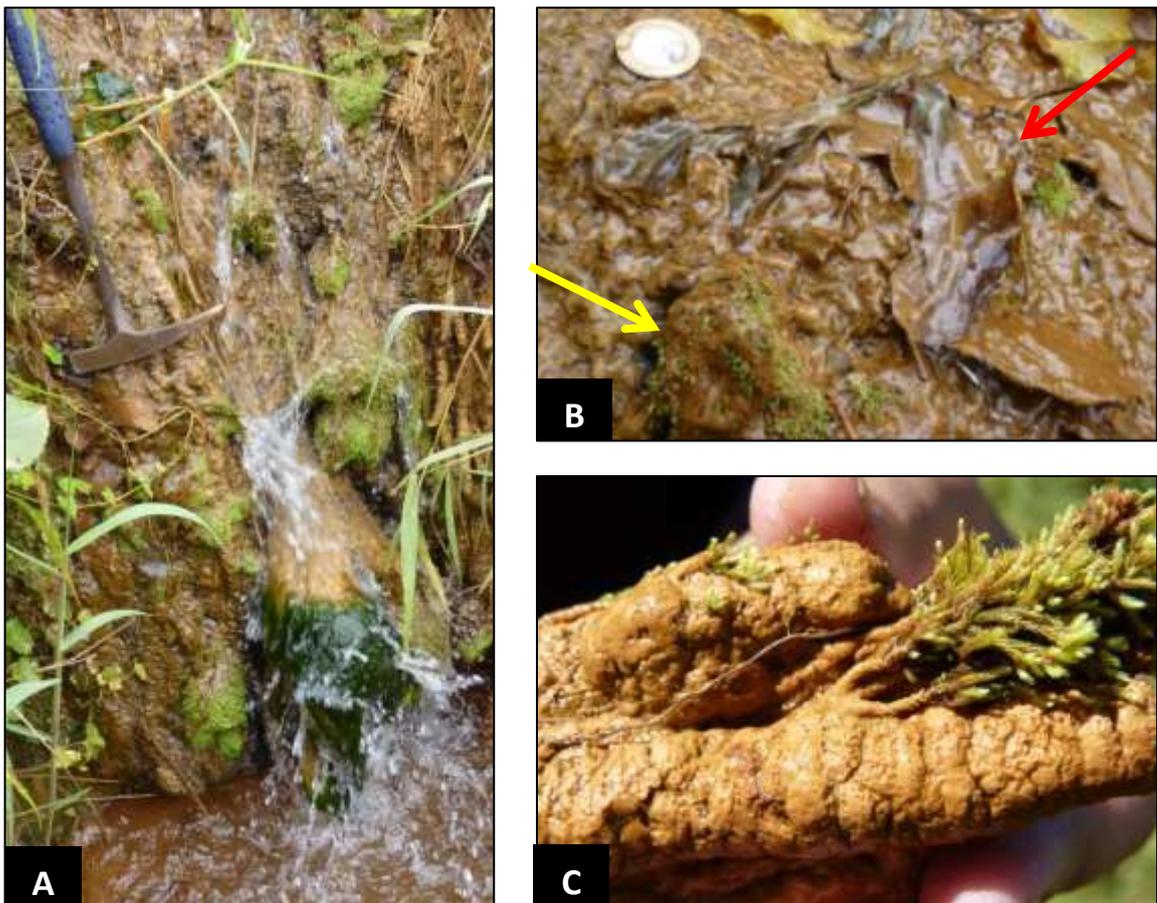


Figura 22 – (A) Depósito ativo de tufa em cascata com macrófitas autóctones sendo incrustadas; (B) foto de detalhe mostrando folhas transportadas pela drenagem (seta vermelha) e macrófitas começando a serem envolvidas pela precipitação carbonática (seta amarela); (C) amostra de mão retirada de uma tufa ainda em formação, mostrando que a matéria orgânica ainda encontra-se preservada. Fotos de outubro de 2012.

No leito das represas também são encontradas esteiras algáticas que auxiliam a formação de tufas, através da fotossíntese que retira o CO_2 dissolvido na água, induzindo a precipitação carbonática (Figura 23).

Por se tratarem de tufas ainda em formação, estas são mais jovens e a matéria orgânica ainda encontra-se preservada.



Figura 23 – (A) Tufa em formação com algas presentes no leito da represa (seta vermelha); (B) esteiras algáticas; (C) filamentos algáticos auxiliando a precipitação carbonática em uma folha. Fotos de outubro de 2013.

6.2.2 Depósitos inativos

Nestes depósitos a precipitação carbonática foi cessada e se caracterizam pela preservação de registros de folhas, galhos, macrófitas, micrófitas, etc., sob a forma de moldes, devido à decomposição da matéria orgânica. Este fato confere na maioria das vezes, uma alta porosidade a estas rochas carbonáticas (Figura 24).

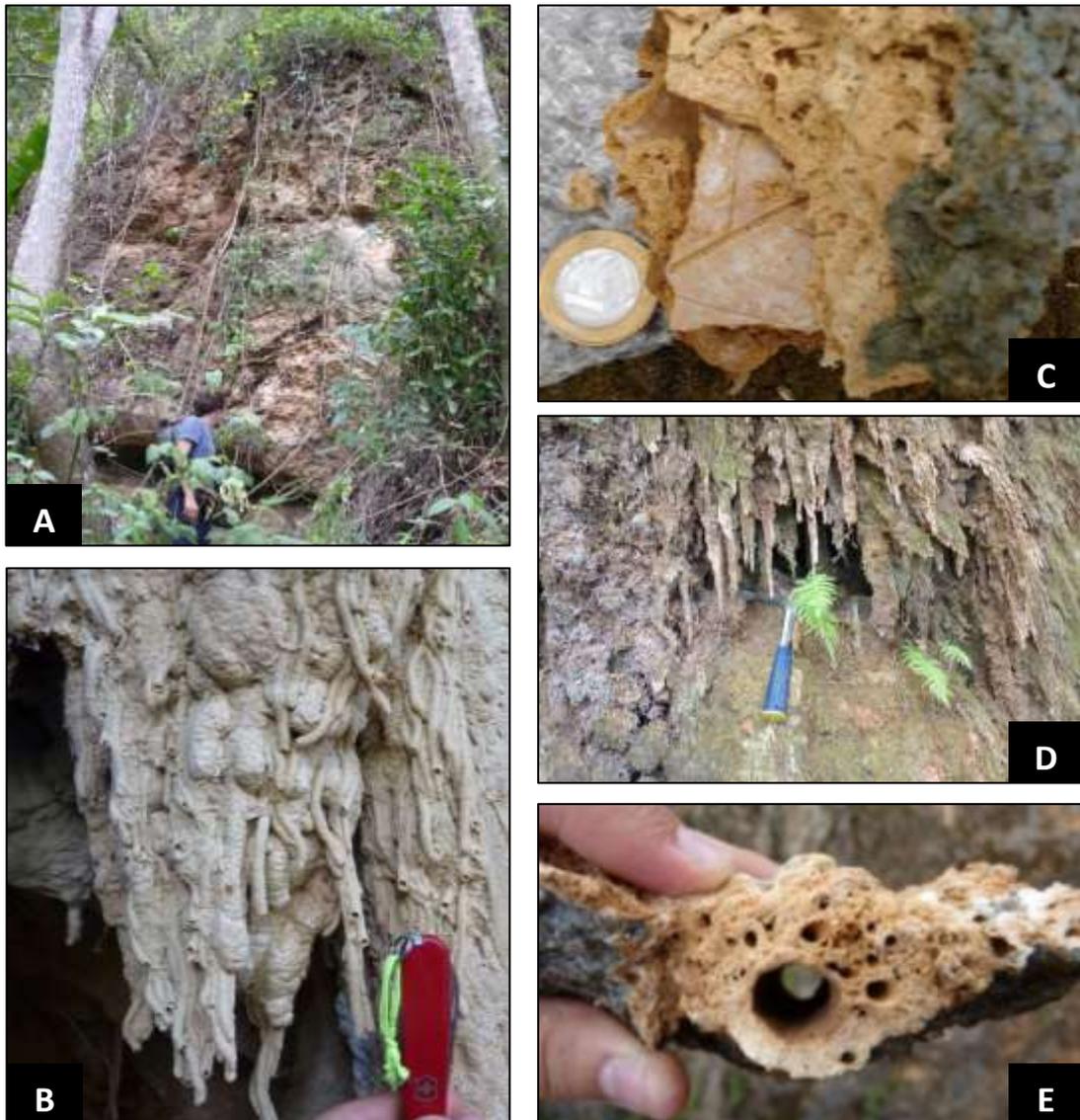


Figura 24 – (A) Depósito inativo de tufa calcária com aproximadamente 7 metros de altura; (B) tufa com moldes de macrófitas; (C) tufa com molde de folha; (D) tufa com raízes pendentes, típica de cascatas; (E) tufa com molde de galhos. Fotos “A”, “B”, “D” e “E” de outubro de 2013 e “C” de maio de 2012.

Além das tufas formadas por fitoclastos, foram encontradas tufas inativas com arcabouço formado por litoclastos do embasamento cimentados por CaCO_3 e por fragmentos de outras tufas mais antigas, e que provavelmente foram transportados em um momento de enxurrada na serra.

Os depósitos inativos apresentam o mesmo contexto de formação das tufas que ainda estão em formação, com cascatas e represas de tufas. Sendo assim, os depósitos ativos são análogos aos antigos depósitos tufáceos.

Além disso, é comum nas tufas em cascata, ativas e inativas, a ocorrência de cavidades e abrigos-sob-rocha formados a partir do crescimento de raízes pendentes que, por vezes, formam estruturas similares aos espeleotemas encontrados em cavernas, como ilustrado na Figura 25.



Figura 25 – (A) Depósito tufáceo com raízes pendentes formando uma cavidade por trás da cascata, foto de outubro de 2012; (B) tufa inativa que formou um pequeno abrigo-sob-rocha, observa-se as raízes pendentes, foto de maio de 2012; (C) tufa com feições similares a

espeleotemas, tais como colunas e estalactites, foto de outubro de 2012; (D) outro abrigo-sob-rocha formado por raízes pendentes, foto de abril de 2013.

No depósito Dezoito de Março é comum à coexistência lateral de tufas ainda em formação e depósitos tufáceos inativos. Este aspecto pode ser explicado através de mudanças na direção do curso da drenagem devido à obliteração desta pelo crescimento das tufas, ou mesmo, por processos erosivos e neotectônicos.

A drenagem flui a partir da nascente próxima ao topo da serra dissecando o relevo formando tufas em cascata e represas de tufas a jusante. Porém, este fluxo pode ser encerrado e/ou migrar para adjacência, propiciando a visualização em campo de depósitos inativos por onde o fluxo deveria deslocar-se anteriormente, ao lado de tufas ativas, por onde atualmente a drenagem flui desenvolvendo os depósitos tufáceos, em mesmo nível topográfico e estratigráfico (Figura 26).

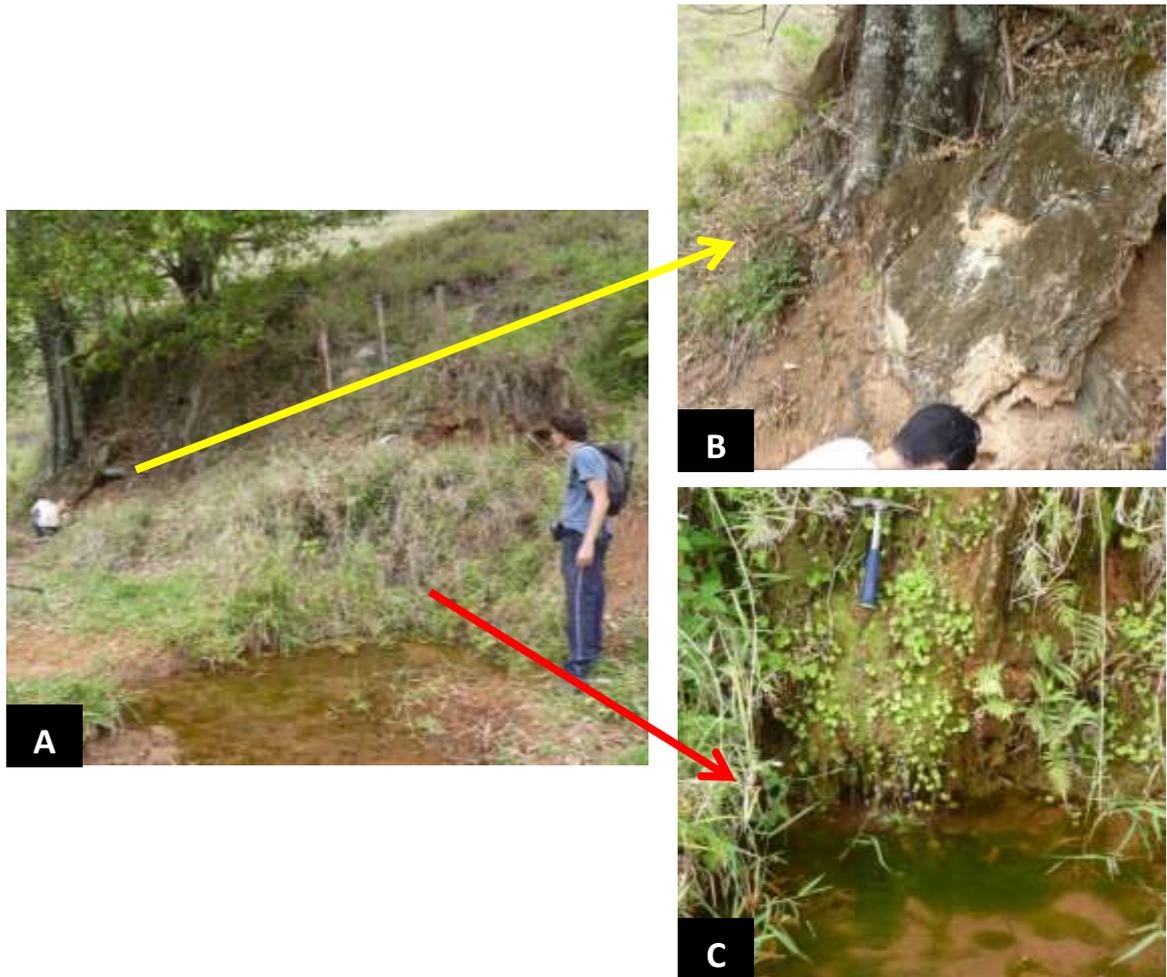


Figura 26 – (A) Panorama geral mostrando depósitos ativos e inativos de tufas calcárias adjacentes; (B) detalhe do depósito inativo; (C) detalhe do depósito ativo. Fotos de outubro de 2013.

Outrossim, devido ao fato do fluxo de água apresentar uma sazonalidade, reflexo da variação do regime de chuvas na região ao longo do ano, depósitos antes chamados de inativos podem voltar a precipitar e dissolver material carbonático, e se tornarem novamente ativos, sobretudo em épocas de maior pluviosidade (Figura 27). Lembrando que se deve sempre considerar a influência da água de nascente que percola através de fraturas, e que também é responsável pela formação destes carbonatos continentais.



Figura 27 – (A) Depósito tufáceo inativo em maio de 2012 e, (B) o mesmo depósito, ativo, precipitando tufa na cascata em outubro de 2012.

6.3 Descrição faciológica

6.3.1 FÁCIES

A partir dos depósitos tufáceos estudados foram determinadas cinco distintas litofácies: fácies fitohermal estromatolítica (Fe), fácies fitohermal macrofítica (Fm), fácies macrodetritica fitoclástica (Mf), fácies macrodetritica litoclástica (Ml) e fácies espeleotema de cascata (Ec) (Tabela 9).

Tabela 9 – Tabela de fácies tufáceas com suas respectivas descrições, proposta para o depósito Dezoito de Março.

CÓDIGO	DIAGNOSE	DESCRIÇÃO
Fe	Fitohermal estromatolítica	Tufa autóctone laminada, com intercalações de bandas micríticas e microespáticas, que frequentemente formam feições domais.
Fm	Fitohermal macrofítica	Tufa autóctone sem laminação, mas que preserva moldes e vestígios de macrófitas, micrófitas e algas, gerando uma textura porosa.
Mf	Macrodetrítica fitoclástica	Tufa alóctone clasto-suportada com arcabouço formado por galhos, troncos, folhas, etc., e que constantemente preserva seus moldes, gerando uma textura porosa.
Ml	Macrodetrítica litoclástica	Tufa alóctone clasto-suportada com arcabouço formado por seixos e calhaus do embasamento e/ou intraclastos de outras tufas mais antigas.
Ec	Espeleotema de cascata	Tufa autóctone clasto-suportada com arcabouço formado por raízes de plantas dispostas sob a forma de cascatas, que frequentemente desenvolvem estruturas similares a espeleotemas e abrigos-sob-rocha.

6.3.1.1 Fácies fitohermal estromatolítica (Fácies Fe)

Está fácies estaria associada aos depósitos autóctones de tufas que desenvolvem laminações que, por vezes, formam feições domais muito semelhantes às estruturas encontradas em estromatólitos, daí o uso da terminologia “estromatolítica” para a sua diagnose, fator que a distingue das demais litofácies determinadas.

Macroscopicamente são formadas por laminações milimétricas a centimétricas de calcita microespática precipitadas *in situ*, com bandas de no máximo 2 cm de espessura, que

são melhores observadas com o auxílio de uma lupa de mão, onde é possível se constatar que os cristais de calcita estão paralelos e verticalizados em relação à superfície da laminação (figuras 28 e 29).



Figura 28 – Bandas de calcita espática mais claras intercaladas a níveis micríticos mais escuros, esta alternância é mais bem observada no microscópio. As laminações desenvolvem feições domais que se assemelham as estruturas encontradas nos estromatólitos.

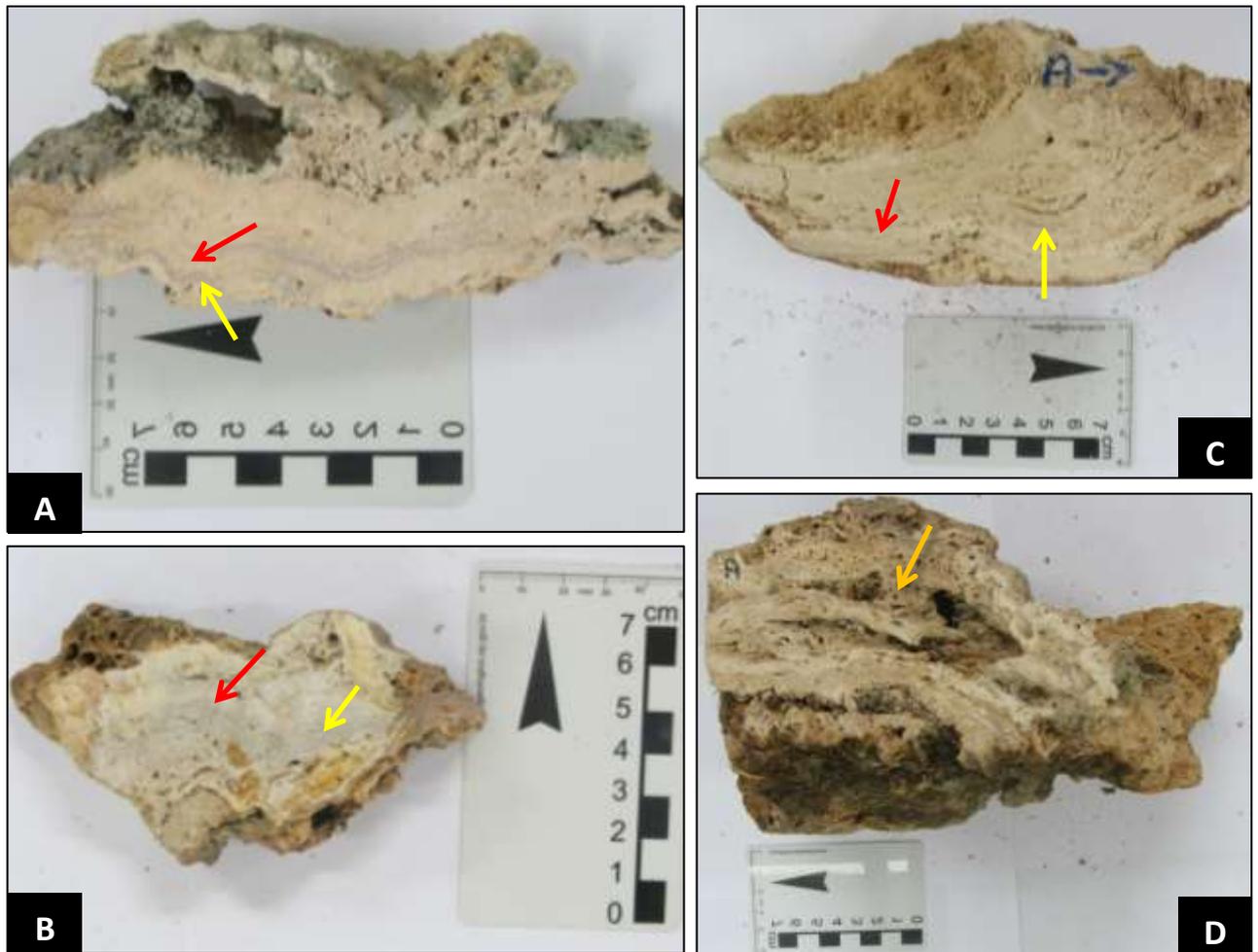


Figura 29 – Amostras serradas (A) TH-3, (B) TH-1, (C) MN-173-RS, (D) DM-1C; amostras laminadas com níveis mais claros de cor bege (seta vermelha) intercalados a níveis mais escuros acinzentados (seta amarela), que constantemente desenvolvem feições domais, além disso, há intercalações lenticulares da fácies macrodetrítica fitoclástica (Mf) (seta laranja).

Microscopicamente se observa uma clara intercalação de bandas microespáticas isópacas de coloração mais clara, alternadas a bandas micríticas mais escuras. As espessuras desses níveis são variadas, com um claro predomínio da fase micrítica em relação à espática. A calcita é o principal constituinte cristalino, com poucos argilominerais associados e baixíssima contribuição de terrígenos. De fato, como constatado na amostra de mão, microscopicamente também se observa que os cristais de calcita em lâmina possuem continuidade óptica perpendicular à laminação, com os cristais podendo até mesmo exceder as linhas que marcam o acamamento da rocha (Figura 30).

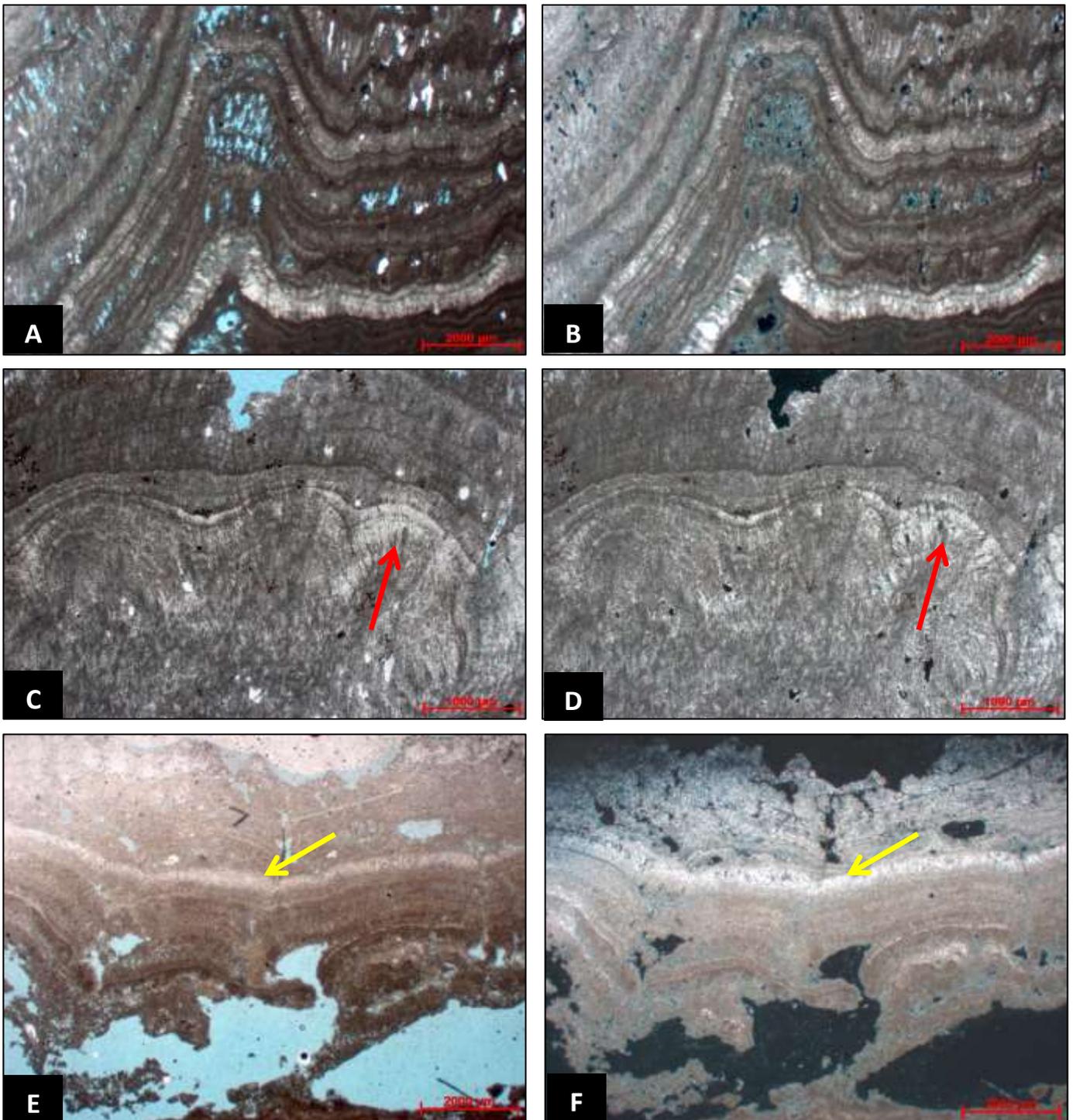


Figura 30 – Feições microscópicas típicas da fácies fitohermal estromatolítica (Fe). Fotomicrografia da lâmina MN173-RS com escala de 2000 μm mostrando laminações escuras micríticas tipicamente de origem microbiana, intercaladas a lâminas espáticas isópacas e mais claras, (A) nicóis paralelos e (B) nicóis cruzados. Fotomicrografia da lâmina MN185-RS com escala de 1000 μm mostrando feições domais similares as estruturas encontradas em estromatólitos com cristais sintaxiais de calcita microespática perpendiculares ao acamamento (seta vermelha), (C) nicóis paralelos e (D) nicóis cruzados. Fotomicrografia da lâmina TH1-A com escala de 2000 μm , exibindo feições domais ricas em micrita, mas com uma banda mais espessa de calcita microespática (seta amarela), (E) nicóis paralelos e (F) nicóis cruzados.

Nestes níveis laminados repetidamente, ocorrem filamentos algálicos e bacterianos (Figura 32 - A, B, C, D e E), que evidenciam a contribuição destes organismos no desenvolvimento desta litofácies, sendo que é comum às amostras apresentarem colônias algais e bacterianas incrustantes na superfície do substrato, o que confere uma coloração esverdeada a rocha. Estas colônias possuem um aspecto gelatinoso devido à presença do EPS responsável pela nucleação bioquímica do carbonato de cálcio, e apresentam lama carbonática no seu entorno (Figura 31).

Podem ocorrer formas fibro-radiadas de calcita espática (*shrubs*) atribuídas a ambientes relativamente calmos e pouco energéticos (GUO & RIDING, 1994). Chafetz & Guidry (1999) diferenciam os *shrubs* em dois tipos: *shrubs* bacterianos (forma mais irregular, arredondada e menores dimensões) e *shrubs* cristalinos (mais retilíneo, espático, contínuo e de maiores dimensões) (Figura 32 - F).



Figura 31 – Córrego a jusante de uma tufa em cascata, com colônias algais e bacterianas de aspectos gelatinoso, associados à lama carbonática. Foto de outubro de 2013.

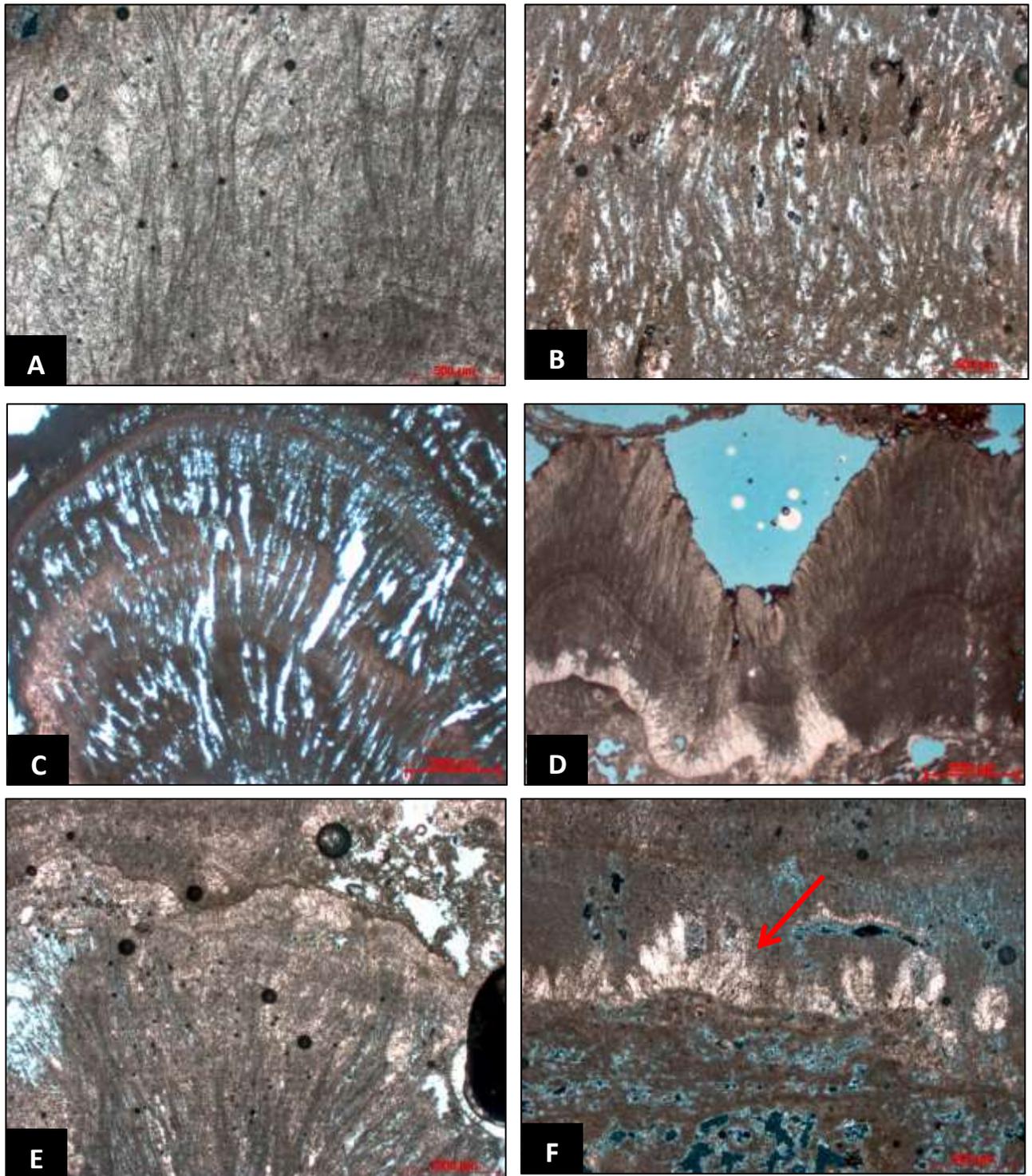


Figura 32 – Fotomicrografias: (A – lâmina MN169-RS) e (B – lâmina DM-2E-A) com escala de 500 μm e nicóis cruzados e paralelos, respectivamente, apresentando vestígios de filamentos algais; (C – lâmina TH1-A) com escala de 2000 μm e nicóis paralelos, com prováveis filamentos de cianobactérias radiados e porosidade interfilamentosa; (D – lâmina MN185-RS) e (E – lâmina DM-2D) com escala de 2000 μm e 1000 μm, respectivamente, e nicóis paralelos, com estrutura arborecescente formada por cristais carbonáticos; (F – lâmina MN169-RS) com escala de 500 μm e nicóis cruzados, mostrando *shrubs* cristalinos (seta vermelha) imersos em uma textura grumosa, que grada a uma textura micrítica.

No mesmo contexto destas laminações foram encontradas texturas grumosas que também foram atribuídas aos processos microbianos, que retiram o CO₂ da água carbonatada para a realização das suas atividades metabólicas, com micritos de texturas grumosas de cor marrom escura, principalmente, no entorno da porosidade (Figura 33). Ademais, devido ao fato desta fácies apresentar principalmente uma estrutura finamente laminada rica em micrita, sugere-se que a sua gênese seja estritamente relacionada a microrganismos, tal como os estromatólitos. Já as lâminas isópacas de calcita espática poderiam ter a sua formação atribuída a momentos desfavoráveis ao desenvolvimento dos biofilmes, prevalecendo os processos físico-químicos em detrimento a atividade microbiana, mas são menos representativas que as lâminas micríticas.

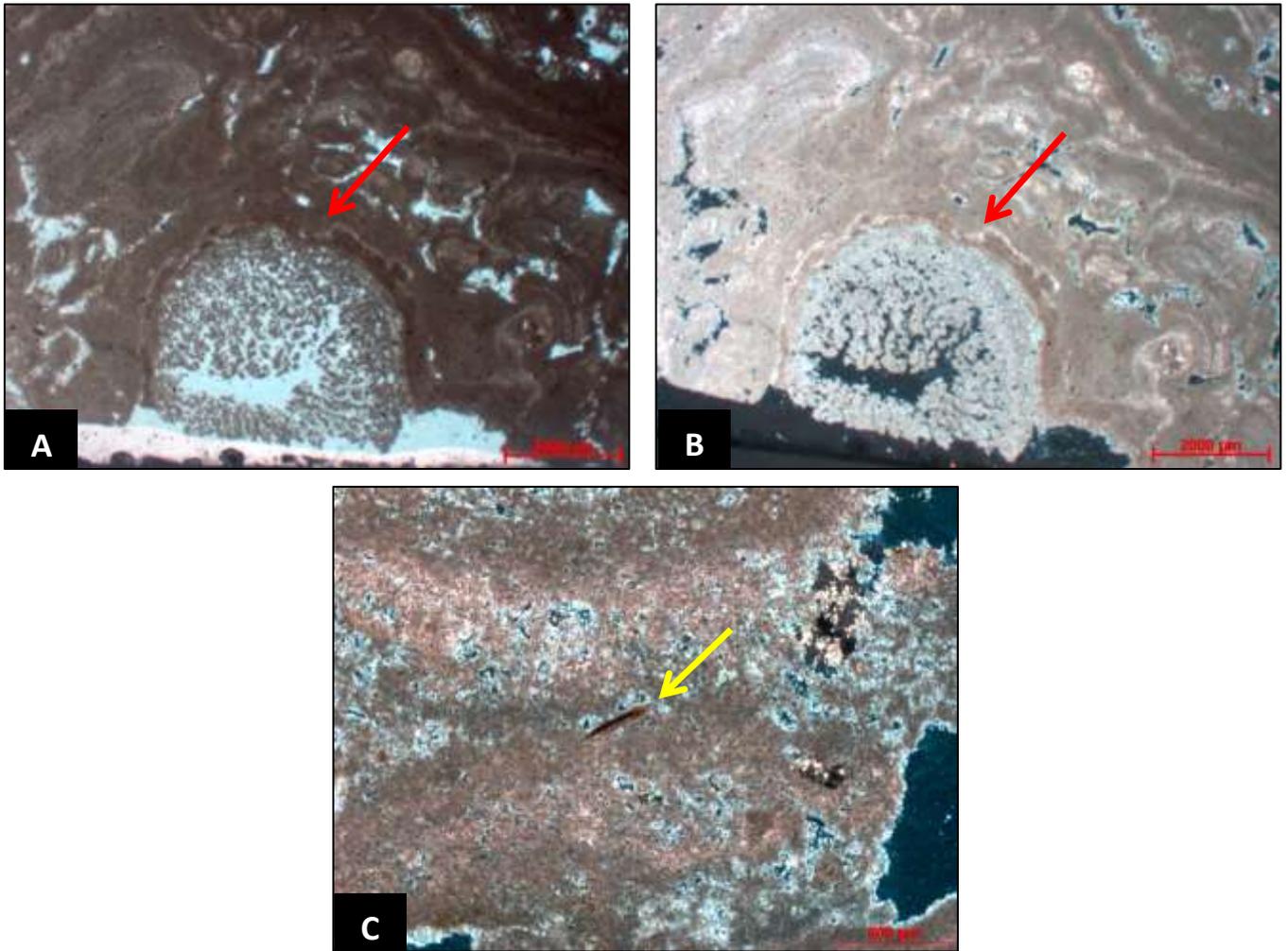


Figura 33 – Fotomicrografias da lâmina TH1-B com escala de 2000 μm , exibindo uma textura grumosa circular (seta vermelha) e uma textura micrítica laminada, (A) com nicóis paralelos e (B) com nicóis cruzados; e (C) foto da lâmina DM-2C-A com nicóis cruzados e escala de 500 μm , exibindo uma textura grumosa associada a processos microbianos, e no centro ocorre um cristal de biotita (seta amarela).

A fácies Fe apresenta uma alta cimentação por calcita microespática e espática (Figura 34), que localmente chega a 10% da rocha, e também é caracterizada por uma porosidade de baixa representatividade, aproximadamente 5% da rocha, do tipo interfilamentosa. Além disso, pode apresentar pequenos poros formados por seções de tubos de plantas, que provavelmente foram anexados a incrustação pelos microorganismos. Quando comparada as demais litofácies apresenta uma densidade mais elevada e um material menos friável.

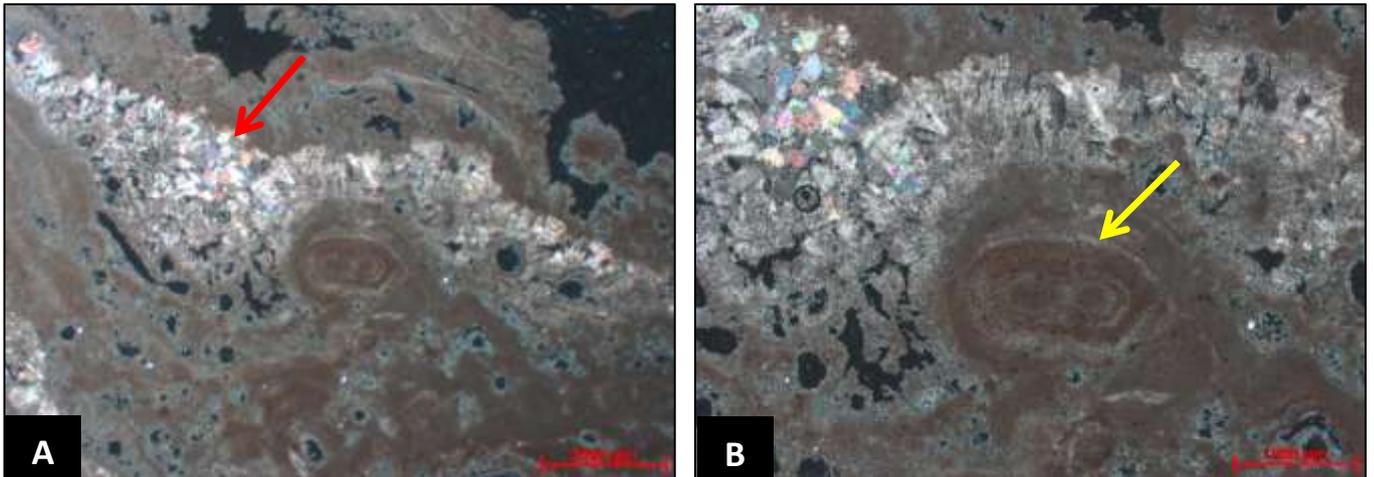


Figura 34 – Fotomicrografias com nicóis cruzados da lâmina TH1-B, (A) com escala de 2000 μm mostrando um cimento de calcita espática (seta vermelha) imerso em uma textura micrítica, e (B) com escala de 1000 μm exibindo em destaque uma laminação micrítica concêntrica (seta amarela).

Segundo a classificação de Dunhan (1962) (Tabela 3) esta litofácies seria um *boundstone*, enquanto que para Embry & Klovan (1971) (Tabela 4) seria um *bindstone*. Já para Pedley (1990) (Tabela 1) e Ford & Pedley (1996) (Tabela 2) seriam uma tufa *fitohermal boundstone* e tufa *fitohermal do tipo estromatolítica*, respectivamente. As amostras coletadas em campo que representam esta litofácies são a: DM-1C; DM-2D; DM-2E; MN-169-RS; MN-173-RS; MN-178-RS; MN-185-RS, TH-1 e TH-3.

6.3.1.2 Fácies fitohermal macrofítica (Fácies Fm)

A fácies Fm ocorre associada às cascatas e quebras do relevo, onde a água flui com maior turbulência, favorecendo a precipitação físico-química de CaCO_3 por escape de CO_2 , ocorre com variadas dimensões ao longo de todo o depósito Dezoito de Março. São depósitos autóctones de tufas calcárias formadas a partir de macrófitas que funcionam como um núcleo para a precipitação carbonática. A fácies possui a calcita como principal fase cristalina e traços de argilominerais (menos que 1%). Esta litofácies possui a sua gênese associada a um

ambiente amplamente povoado por algas macroscópicas, plantas e musgos, além de microorganismos, entretanto desenvolvem uma tufa com caráter maciço, ou seja, sem estrutura laminada, o que a difere da fácies Fe descrita anteriormente.

Texturalmente são micríticas a microespáticas, sustentadas pelo arcabouço e com estruturação condicionada pela ação de algas e cianobactérias, sua precipitação ocorre *in situ* diretamente sobre algas micrófitas e macrófitas, plantas e cianobactérias, que se preservam como moldes e vestígios incrustantes. Apresentam em sua maioria grande preservação fossilífera, permitindo a observação de macrófitas, principalmente briófitas, atualmente sendo incrustadas pela precipitação carbonática.

Esta fácies é caracterizada macroscopicamente por sua textura porosa, possivelmente com a sua gênese associada a períodos de seca, onde a redução da vazão de água concentra os íons de carbonato favorecendo a precipitação química, além disso, nestes períodos haveria uma redução da atividade microbiana, principalmente devido à queda nas populações de cianobactérias e de bactérias sulfato-redutoras (CORRÊA, 2011), tendendo a gerar a textura porosa (Figura 35). A incrustação de uma alga macroscópica ocorreria pelo revestimento por microcristais de calcita e microestruturas filamentosas de cianobactérias.

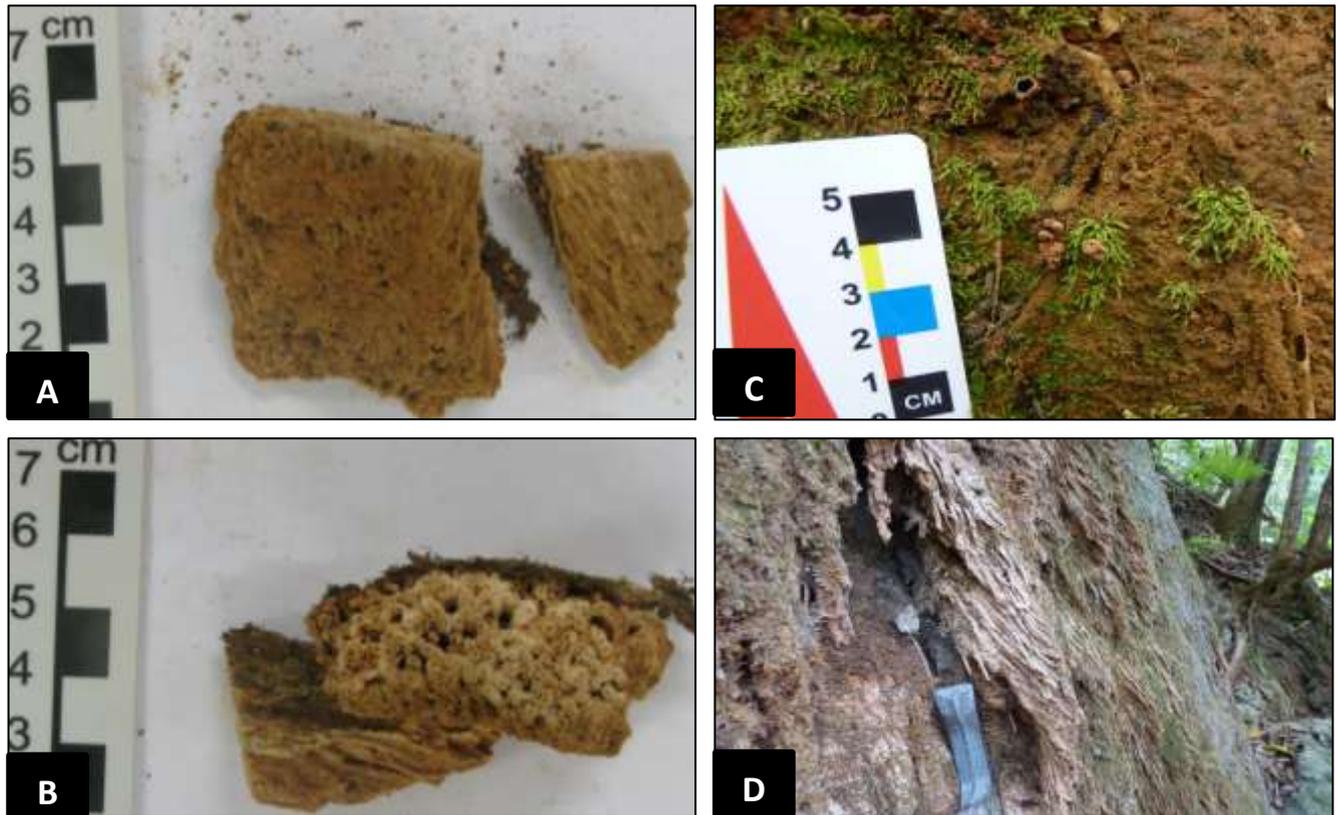


Figura 35 – (A) e (B) Fotos da amostra DM-3 com um corte longitudinal e transversal, respectivamente, mostrando moldes de briófitas que foram incrustadas por carbonato de cálcio, e que se encontram orientadas, possivelmente, devido ao curso de água da drenagem que alimentava a área; (C) macrófitas *in situ* sofrendo precipitação carbonática, foto de outubro de 2012; (D) local de onde foi retirada a amostra DM-3, foto de outubro de 2013.

Microscopicamente observa-se predomínio de calcita espática, que possui sua formação interpretada como a precipitação química de carbonato a partir da turbulência da água em cascata, visto que é somente neste local que se desenvolve este tipo de tufa (Figura 36). Além disso, há cimento calcítico fibro-radiado preenchendo a porosidade sob a forma de esparito, que é precipitado em torno da porosidade gerada a partir dos moldes de macrófitas preservados após a decomposição da matéria orgânica. Possui uma porosidade alta (em média 20-25% da rocha), formada principalmente pela decomposição de moldes fósseis, sua porosidade segundo Choquete & Pray (1970) (Tabela 5) pode ser caracterizada como sendo do tipo móldica ou intergranular (entre os talos das plantas).

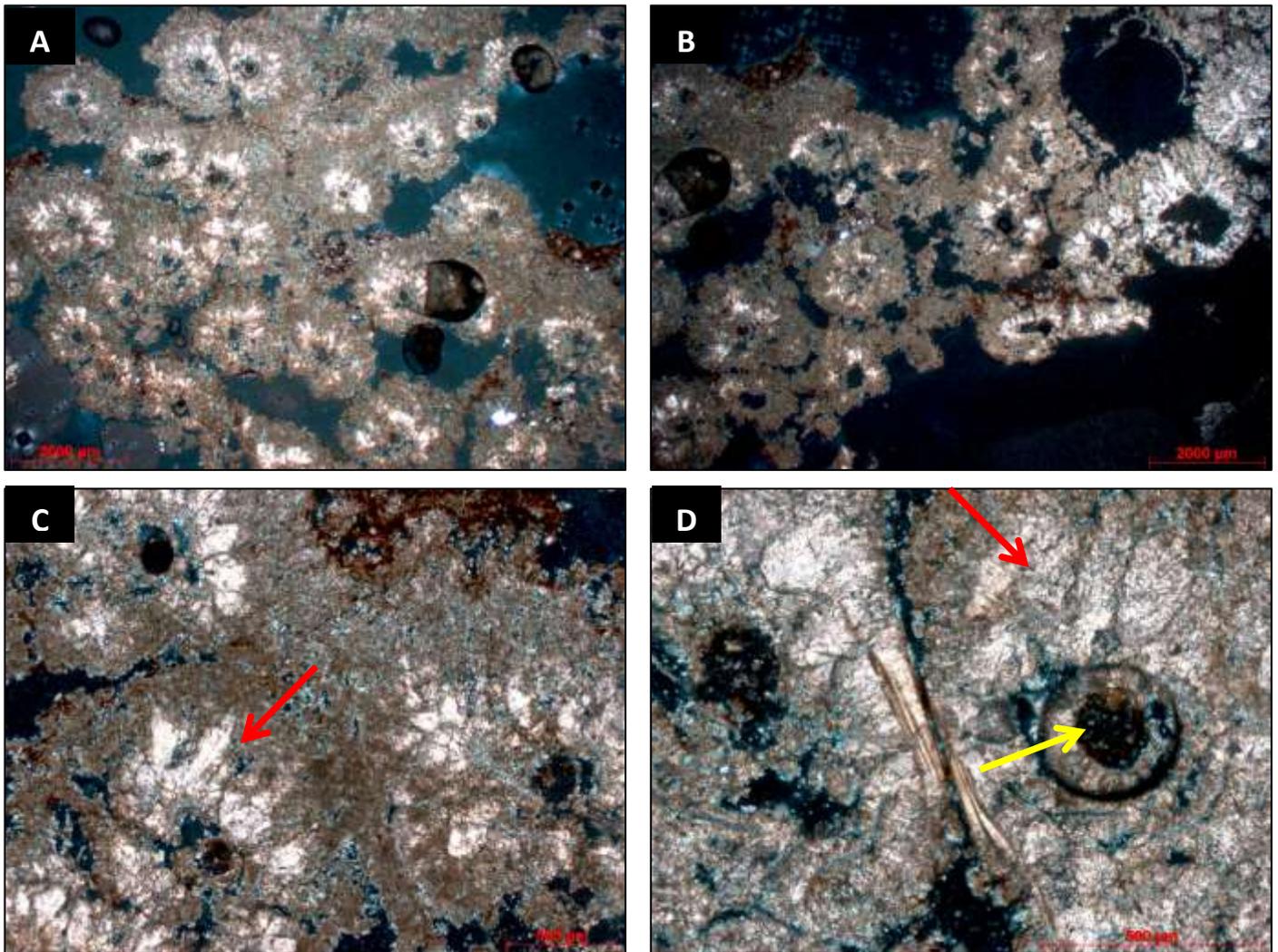


Figura 36 – Fotomicrografias com nicóis cruzados da lâmina DM-3, (A) e (B) com escala de 2000 μm , mostrando a textura típica encontrada nesta microfácies com moldes de macrófitas que foram cimentados por carbonato de cálcio, produzindo uma rocha de alta porosidade; (C) com escala de 500 μm , com a seta vermelha mostrando um cimento fibro-radiado de calcita espática que se desenvolveu em torno do poro; (D) foto em maior detalhe, com a seta amarela marcando o poro, e a seta vermelha o cimento calcítico.

A fácies Fm é caracterizada como uma tufa do tipo *fitohermal framestone* ou uma tufa *fitohermal com macrófitas recobertas por cimento micrítico*, por Pedley (1990) (Tabela 1) e Ford & Pedley (1996) (Tabela 2), respectivamente. Além disso, seguindo as classificações para rochas carbonáticas de Dunhan (1962) (Tabela 3) e Embry & Klovan (1971) (Tabela 4) está litofácies seria correlacionável há um *boundstone* e *bafflestone* ou *framestone*, respectivamente. A única amostra coletada em campo representativa desta litofácies foi a: DM-3.

6.3.1.3 Fácies macrodetrítica fitoclástica (Fácies Mf)

Está fácies é caracterizada por apresentar uma porosidade elevada e um conteúdo fossilífero abundante caracterizado por moldes e vestígios de galhos, folhas e troncos de árvores, que foram transportados junto à drenagem responsável pela dissolução e transporte em solução do bicarbonato de cálcio necessário ao desenvolvimento dos depósitos tufáceos. É a fácies volumetricamente mais importante do depósito Dezoito de Março. Há depósitos ativos onde é possível se observar a presença de fitoclastos depositados em pequenas represas a jusante das tufas em cascatas, encobertos por uma fina e inconsolidada camada de lama carbonática.

Logo, a fácies Mf tem a sua gênese relacionada à incrustação de matérias orgânicas (folhas, galhos, etc.) transportados ao longo da drenagem. Quando a drenagem atinge uma menor energia, seja por encontrar uma barreira que pode ser formada pela própria tufa ou por atingir um corpo de menor energia, o material se deposita (Figura 37) e cristais de carbonato de cálcio precipitam por nucleação física, principalmente, e bioinfluência sobre esta matéria orgânica, que posteriormente é decomposta, preservando-se somente o seu molde. Caracteristicamente apresenta uma porosidade móldica, segundo Choquete & Pray (1970), elevada, podendo representar até 20-30% da amostra, ocorrendo em escalas milimétricas a centimétricas, dispostas de forma orientada ou não.



Figura 37 – (A) e (B) Contexto de campo com represas formadas a jusante das cascatas, onde se depositam galhos, folhas, etc., que foram transportados ao longo da drenagem e, que a partir da qual se inicia a precipitação carbonática. Fotos de outubro de 2013; (C) tufa macrodetritica fitoclástica com moldes de galhos preservados. Foto de janeiro de 2014.

Macroscopicamente pode ser caracterizada como uma rocha altamente porosa, de baixa densidade e muito friável, com exuberantes moldes de folhas preservados (Figura 38), além disso, no microscópio observa-se que na borda dos poros pode ocorrer sobrecrecimento de cristais de minerais de carbonato (Figura 39 – A). Esta porosidade muitas vezes possui uma forma cilíndrica, resultado de cortes transversais dos moldes de galhos e plantas, com moldes circulares milimétricos a centimétricos, com revestimento de calcita espática e espátos fibrorradiados, indicando um processo de cimentação físico-química (Figura 39 - B, C, D e E). Há uma pequena contribuição de terrígenos geralmente subangulosos, compostos por quartzo e fragmentos líticos do embasamento, que provavelmente foram transportados junto à drenagem e anexados a incrustação.

Nesta litofácies também foram encontrados *shrubs* cristalinos (Figura 39 – F), mais retilíneo, espático e contínuo, e de maiores dimensões, atribuídos a ambientes calmos e pouco

energéticos (GUO & RIDING, 1994), ou seja, relacionados às represas formadas a jusante das tufas em cascata, onde há o acúmulo do material fitoclástico.

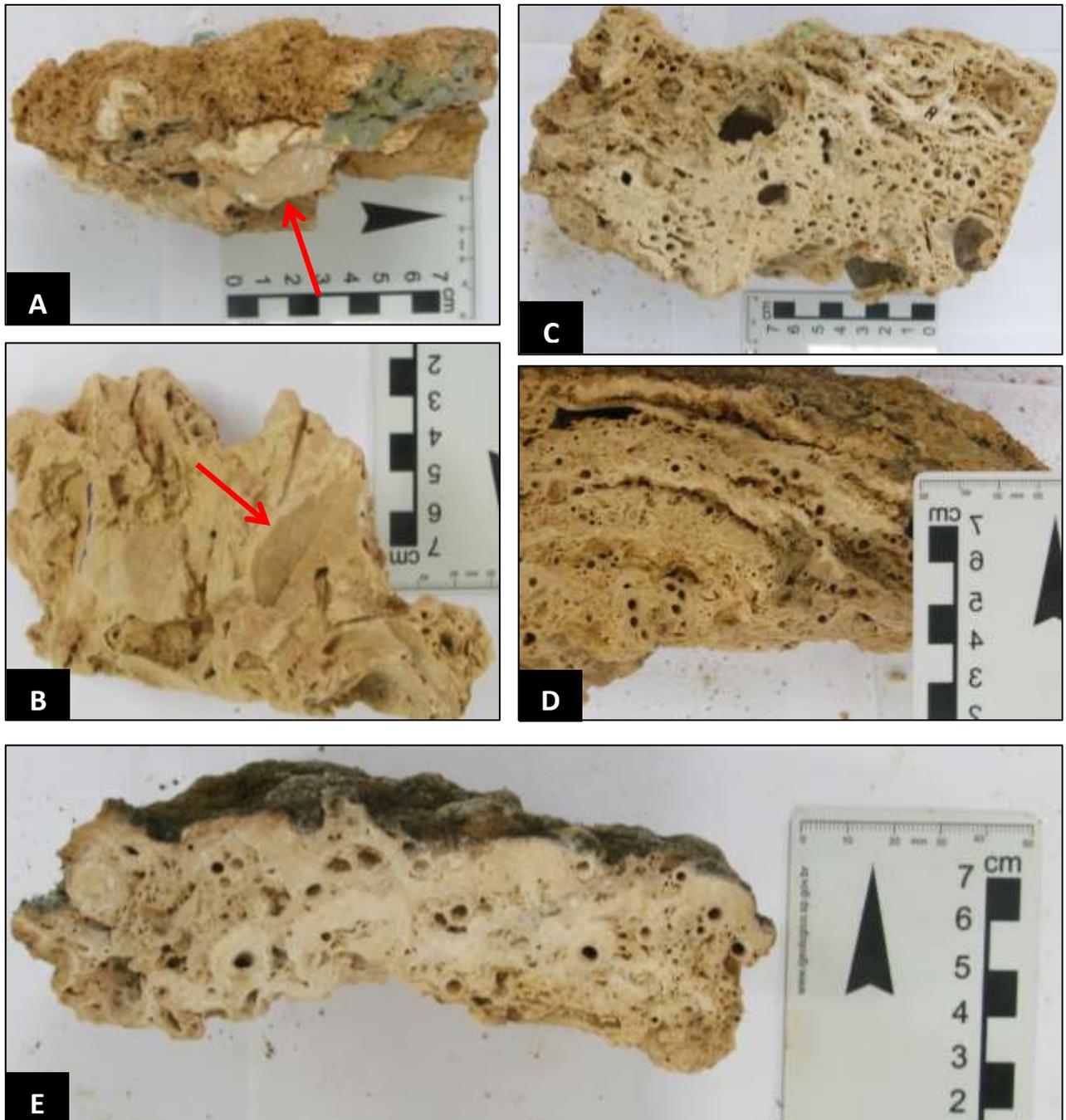


Figura 38 – Amostras de tufas calcárias macrodetriticas fitoclásticas, (A) DM-1D e (B) TH-3, exibindo em destaque (seta vermelha) moldes bem preservados de folhas; (C) TH-2, (D) DM-2B e (E) DM-2D, mostrando moldes de galhos e uma alta porosidade.

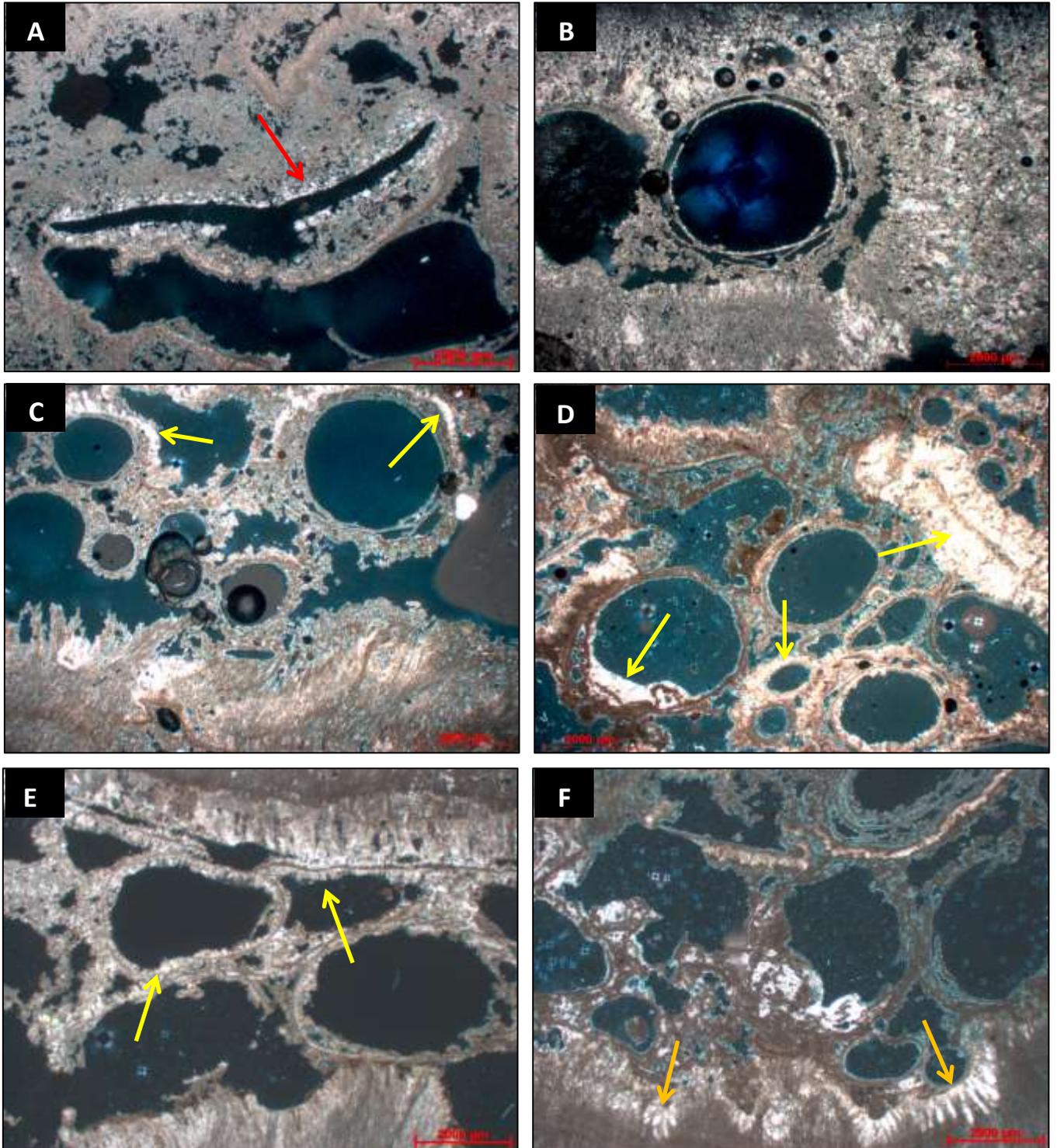


Figura 39 – Fotomicrografias com nicóis cruzados e escala de 2000 μm , das lâminas: (A) DM-1C-B, mostrando um provável molde de galho preenchido por cimento carbonático (seta vermelha); (B) DM-2D, (C) DM-2E-A, (D) MN169-RS e (E) MN185-RS, exibindo uma porosidade de forma cilíndrica, provavelmente, devido a cortes transversais em moldes de galhos. Em destaque, crescimento de um revestimento carbonático em torno da porosidade (seta amarela); (F) MN178-RS, com a seta laranja mostrando os *shruvs* cristalinos (calcitas espáticas fibro-radiadas).

Segundo a classificação de Pedley (1990) (Tabela 1) esta fácies estaria associada a uma tufa *fitoclástica*, enquanto que para Ford e Pedley (1996) (Tabela 2) a uma tufa *macrodetritica fitoclástica*. Já para as classificações gerais de rochas carbonáticas de Dunhan (1962) (Tabela 3) e Embry & Klovan (1971) (Tabela 4) estas se encaixariam como um *packstone* e *rudstone*, respectivamente. As amostras representativas destas litofácies foram a: DM – 1C; DM – 2C; DM – 2D; DM – 2E; MN – 168 – RS; MN -169 – RS; MN – 178 – RS; MN – 185 – RS e TH – 2.

6.3.1.4 Fácies macrodetritica litoclástica (Fácies MI)

Macroscopicamente a fácies MI é caracterizada como um conglomerado maciço sustentado por seixos e calhaus angulosos de mármore, anfíbolitos, quartzitos e intraclastos de tufas mais antigas (Figura 40 – A, B e C), ou sustentados por matriz de areia quartzosa seixosa (Figura 40 – D).

Apresenta cimentação fraca a moderada por CaCO_3 e representa a litofácies mais escassa no depósito Dezoito de Março, mas de grande importância para o entendimento da evolução do sistema deposicional, estando associada a processos trativos e gravitacionais em momentos de mais alta energia, como enxurradas. Possui baixa porosidade, que pode ser classificada como do tipo brecha ou intergranular segundo Choquette & Pray (1970) (Tabela 5).



Figura 40 – (A) Aspecto geral de afloramento de tufa litoclástica. Foto de outubro de 2012; (B), (C) e (D) conglomerados maciços formados por clastos de litologias do embasamento e intraclastos de tufas mais antigas. Fotos de outubro de 2013.

Segundo a classificação de Dunhan (1962) (Tabela 3) esta litofácies estaria relacionado a um *packstone*, enquanto que para Embry & Klovan (1971) (Tabela 4) seria um *rudstone* e para Ford & Pedley (1996) (Tabela 2) seria uma tufa *macrodetritica litoclástica*. Já para a classificação de Pedley (1990) (Tabela 1) esta fácies não se encaixaria em nenhum dos tipos especificados pelo autor. A fácies M1 foi observada nas amostras: MN – 173 - RS e MN – 185

- RS. Não foram feitas lâminas delgadas desta litofácies, não sendo possível a sua caracterização microscópica.

6.3.1.5 Fácies espeleotema de cascata (Fácies Ec)

Ocorrem na base dos depósitos sob a forma de tufas em cascata, cachoeira ou escorrimentos, formados *in situ* através do fluxo de gotejamento, e revestem encostas na forma de estruturas métricas. Seu crescimento nas encostas chega a desenvolver espaços vazios, formando abrigos-sob-rocha (Figura 41 – A).

Macroscopicamente formam estruturas muito similares aos espeleotemas encontrados em cavernas, com formas e tamanhos variados (Figura 41 – B e C), sendo geralmente, mais rígidos e menos friáveis que as outras litofácies. A fácies Ec é encontrada tanto em depósitos ativos quanto inativos de tufas, podendo ser observado à formação atual destes espeleotemas. Sua porosidade segundo Choquete & Pray (1970) (Tabela 5) pode ser caracterizada como do tipo caverna, abrigo (*shelter*) ou móldica quando há a dissolução da matéria orgânica que foi nucleada por carbonato de cálcio.

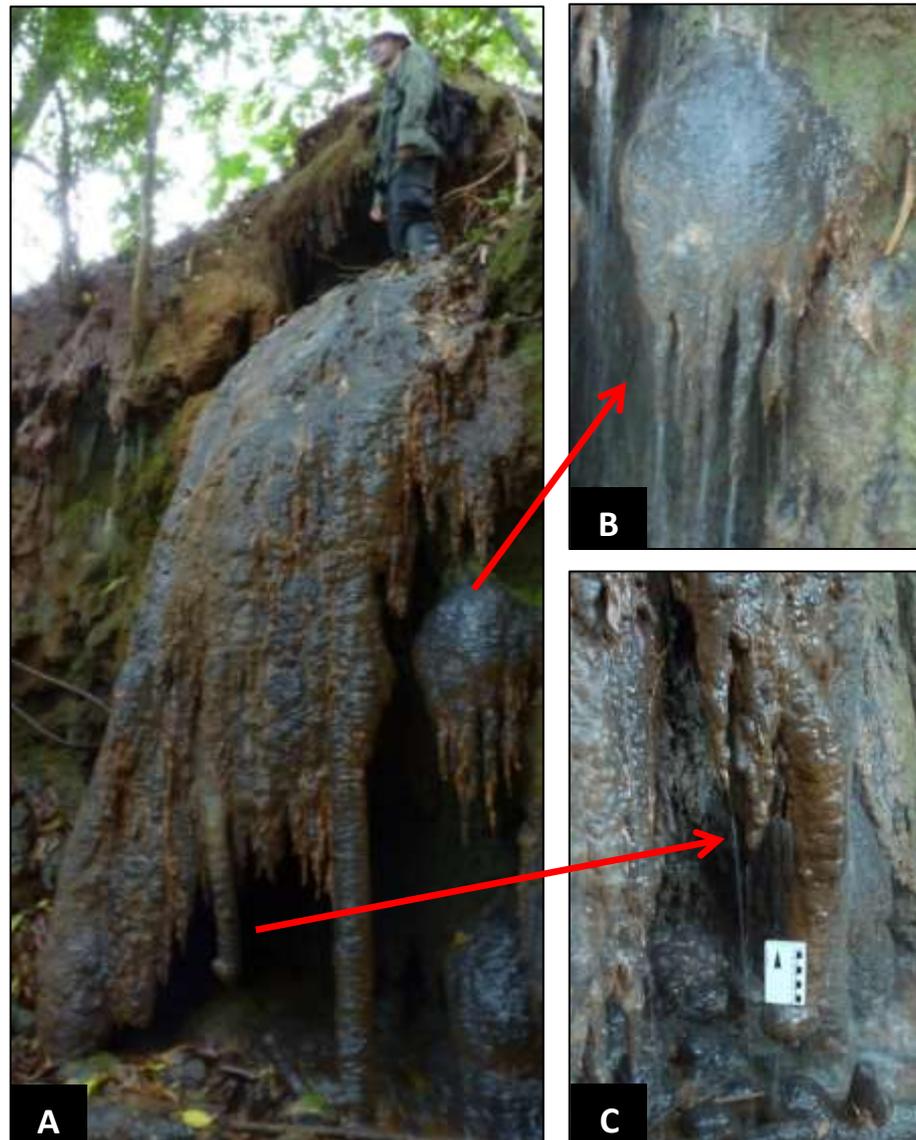


Figura 41 – (A) Abrigo-sob-rocha formado a partir da evolução das tufas ao redor de raízes pendentes com formação de feições peculiares, como destacado nas fotos (B) e (C). Fotos de maio de 2012.

Sua gênese estaria relacionada ao gotejamento que aproveita as raízes das plantas como núcleos para o seu desenvolvimento, servindo de caminho para passagem da água carbonatada e sua posterior precipitação por perda de CO_2 através de processos físico-químicos. Seu crescimento ocorre de maneira gradual, com progressiva precipitação de CaCO_3 , podendo evoluir e até mesmo formar colunas (Figura 42).



Figura 42 – Depósito inativo de tufa calcária com colunas formadas a partir da precipitação carbonática ao redor de raízes pendentes. Foto de outubro de 2013.

Está fácies não se adequa a nenhuma das tipologias tufáceas explicitadas anteriormente nos trabalhos de Pedley (1990) (Tabela 1) e Ford & Pedley (1996) (Tabela 2), apenas de forma geral, para Dunhan (1962) (Tabela 3) está litofácies poderia ser caracterizada como um *boundstone*, e para Embry e Klovan (1971) (Tabela 4) como um *bafflestone* ou *framestone*. Alguns autores incluem está litofácies naquela que seria a tufa *fitohermal macrofítica* (item 6.3.1.2), entretanto neste trabalho optou-se por distingui-las devido ao fato da fácies Ec desenvolver exuberantes estruturas, como estalactites, estalagmites, colunas e outras formas peculiares, as quais não são observadas na fácies Fm. Não foram feitas lâminas delgadas desta litofácies, não sendo possível a sua caracterização microscópica.

6.3.2 FEIÇÕES PÓS-DEPOSICIONAIS

Como explicado anteriormente, depois de formada a tufa pode apresentar uma nova circulação de fluxos d'água por se tratar de uma rocha altamente porosa e permeável (JONES & RENAULT, 2010), culminando em modificações diagenéticas.

Estas modificações podem influenciar nas características petrofísicas da rocha. De fato, uma feição microscópica comumente encontrada nas lâminas estudadas e que se mostrou presente principalmente na fácies Mf foi o preenchimento dos poros por calcita espática, romboédrica e fibro-radiada, sob a forma de cimento em franja (Figura 43). Este processo também é verificado em escala macroscópica e é responsável pela diminuição da porosidade primária da rocha, tornando a tufa menos friável e mais densa.

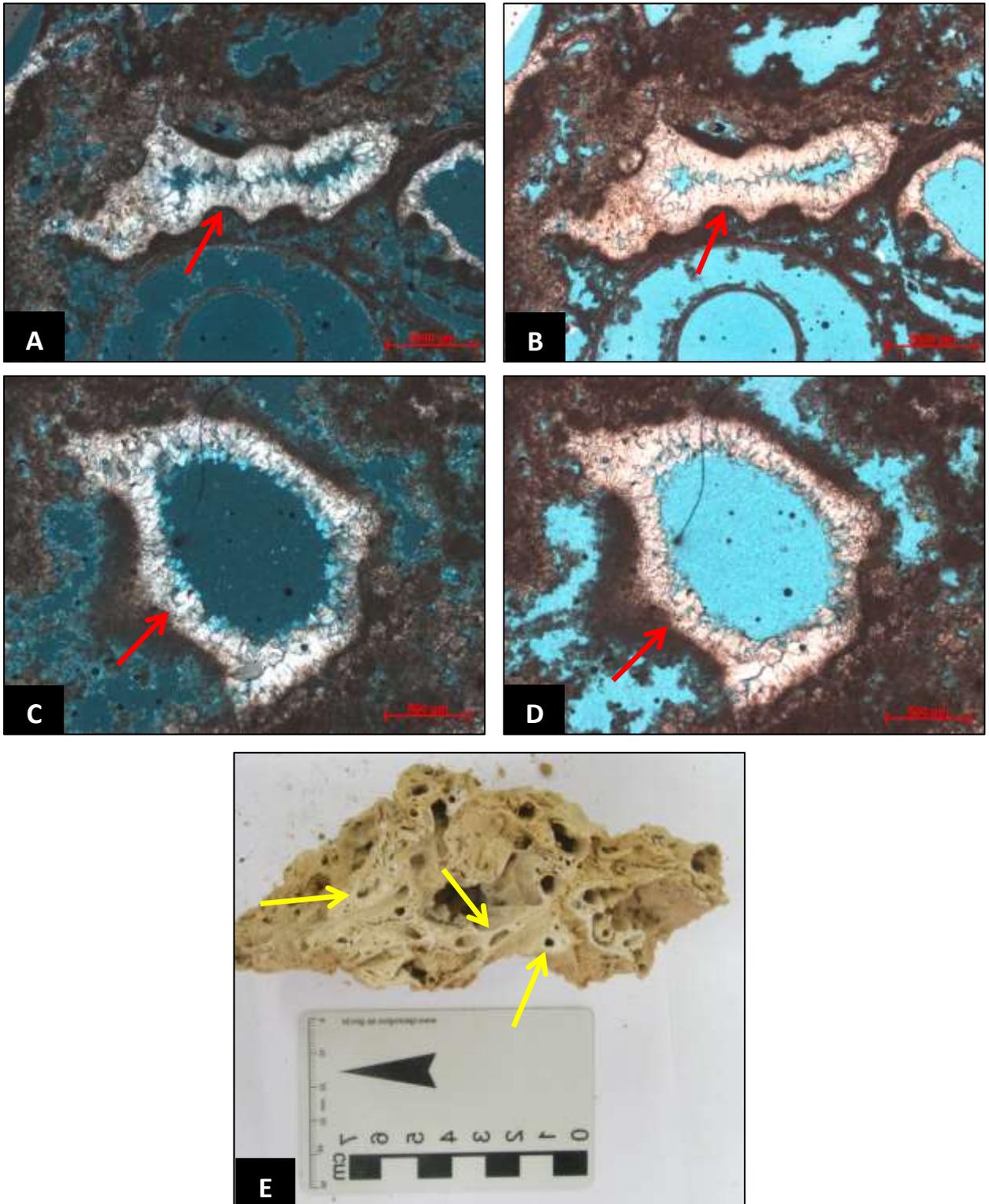


Figura 43 – Fotomicrografias da lâmina TH-2 mostrando em destaque (seta vermelha) cimento em franja de calcita microespática, com aspecto fibro-radiado para dentro do poro: (A) e (B) com escala de 2000 μm e nicóis cruzados e paralelos, respectivamente; (C) e (D) com escala de 500 μm e nicóis cruzados e paralelos, respectivamente; (E) Foto da amostra TH-2, em destaque (seta amarela) notar que a cimentação desenvolve crostas em torno das paredes dos poros.

6.4 Caracterização hidrogeoquímica

Foram realizadas duas coletas de amostra d'água da drenagem, uma no topo do depósito próxima a nascente do córrego, ponto SC-01, UTM: 791665E e 7587089S *Datum* WGS 1984, Zona 23S, e outra no sopé da serra próxima ao fim da drenagem, ponto SC-02, UTM: 791755E e 7587060S *Datum* WGS 1984, Zona 23S, está última com uma clara influência de surgência de águas em fratura.

As coletas foram realizadas em dois períodos distintos, o primeiro em outubro de 2013 durante a primavera, e o segundo em janeiro de 2014 durante o verão, em épocas quando o volume de água na drenagem estava baixo. Corrêa (2011) registrou em suas coletas maiores vazões na mesma drenagem em épocas similares.

Os resultados obtidos para os parâmetros medidos em campo (temperatura, pH, condutividade elétrica e potencial de oxirredução - ORP), assim como o teste de alcalinidade realizado em campo (titulação), onde obteve-se a concentração de HCO_3^- , estão representados a seguir na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores obtidos para os parâmetros medidos e o teste de alcalinidade (titulação) realizado em campo.

DATA	PONTO	T (°C)	pH	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ORP (mV)	HCO_3^- (mg/L)
Outubro de 2013	SC - 01	25,1	7,60	493	220	329
	SC - 02	23,8	7,81	518	173	339
Janeiro de 2014	SC - 01	25,2	8,10	500	47	370
	SC - 02	24,6	8,03	520	134	384

Como observado na Tabela 10, o valor de pH medido em campo mostrou um caráter alcalino. Já os valores encontrados para a condutividade elétrica e o teste de alcalinidade mostraram-se elevados, demonstrando alta concentração de sais ($\text{Ca}^{+2} + \text{HCO}_3^-$) na água.

Entre as duas coletas, observa-se que os valores ORP (potencial de oxirredução) diminuíram, enquanto que os valores de temperatura, pH, condutividade elétrica e alcalinidade aumentaram.

Outros parâmetros medidos por cromatografia iônica (IC) cujos valores foram fornecidos pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC-Rio (LABAGUAS) foram às concentrações de cátions e ânions em mg/L, e o teste de alcalinidade em laboratório (anexos 1 a 8). A Tabela 11 a seguir, traz as concentrações obtidas de Ca e Mg e o valor de HCO_3^- obtido na titulação.

Tabela 11 – Concentrações de Ca, Mg e HCO_3^- em mg/L, valores obtidos pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC-Rio (LABAGUAS).

DATA	PONTO	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)
Outubro de 2013	SC - 01	85,9	4,07	313
	SC - 02	92,3	3,89	328
Janeiro de 2014	SC - 01	93,4	4,53	310
	SC - 02	99,3	4,31	346

As águas coletadas apresentaram concentrações elevadas de cálcio, porém, baixas concentrações de magnésio. Este resultado já era esperado, pois o mármore que funciona como o substrato para a solução possui uma composição calcítica (PEIXOTO & HEILBRON, 2010). Já os teores obtidos em laboratório do ânion bicarbonato (HCO_3^-) se mostraram semelhantes aos valores obtidos para o mesmo parâmetro nas titulações realizadas em campo em ambas as datas.

Nota-se que o ponto SC – 02 em ambas as coletas apresenta um aumento nos valores das concentrações de Ca, Mg e HCO_3^- . Este aumento pode ser explicado pelo fato de neste local ocorrer uma clara contribuição de surgência de água a partir de uma fratura, que se encontra supersaturada em CaCO_3 .

Com estes parâmetros medidos em campo e laboratório, tornou-se possível calcular os parâmetros derivados (índice de saturação em calcita - ISc, razão molar Mg/Ca, dureza total – DT e balanço iônico ou eletroneutralidade - EN) para as águas amostradas, com o auxílio do *softwares PHREEQC Interactive v.3.0.6 e AquaChem v.5.1*. Estes valores encontram-se expressos a seguir na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros derivados calculados com os *softwares PHREEQC Interactive v.3.0.6 e AquaChem v.5.1*.

DATA	PONTO	ISc	Razão Molar Mg/Ca	DT CaCO_3 (mg/L)	EN (%)
Outubro de 2013	SC - 01	0,56	0,08	231	-1,65
	SC - 02	0,81	0,08	246	-1,76
Janeiro de 2014	SC - 01	1,07	0,08	251	0,13
	SC - 02	1,07	0,07	265	-2,47

A dureza total das amostras é elevada o que sugere uma alta concentração de CaCO_3 dissolvido, o que se é confirmado pelo índice de saturação em calcita com valores positivos, indicando que a água coletada estaria supersaturada e com potencial para a deposição de carbonato. Como visto anteriormente, valores de $\text{IS} > 0,05$ indicam que a solução está supersaturada em um determinado mineral.

A razão Mg/Ca mostrou-se extremamente baixa (< 1), o que sugere pouco Mg presente nas águas e que não ocorre a precipitação de aragonita, Hill & Forti (1997) afirmam que a presença de Mg em solução é um dos principais fatores que controlam a precipitação de

aragonita. De fato, na literatura, não são encontradas tufas formadas por aragonita (ALMEIDA, 2011). Porém, a precipitação ou não de aragonita só poderia ser confirmada a partir de outras análises geoquímicas, como difratometria de raio-x.

O valor do balanço iônico expresso sob a forma de porcentagem (EN%) apresentou baixos valores, o que quer dizer que as análises são confiáveis. Como afirmado anteriormente, para que o cálculo do índice de saturação de calcita (ISc) seja aceito, o erro do balanço iônico deve ser menor do que 10% (ALMEIDA, 2011).

Para classificação química e comparação dos distintos grupos de águas foram plotados os conteúdos dos cátions e ânions dominantes em diagramas de Piper (Figura 44), com o auxílio do *software AquaChem v.5.1*. Este combina as informações de dois triângulos, um para os cátions (Ca, Mg e Na+K) e outro para os ânions (HCO₃, Cl e SO₄), em um losango. Os diagramas mostram as proporções relativas dos íons principais e não as suas concentrações absolutas. Após a plotagem, as águas amostradas foram classificadas como cálcio carbonatadas.

Diagrama de Piper – Outubro de 2013

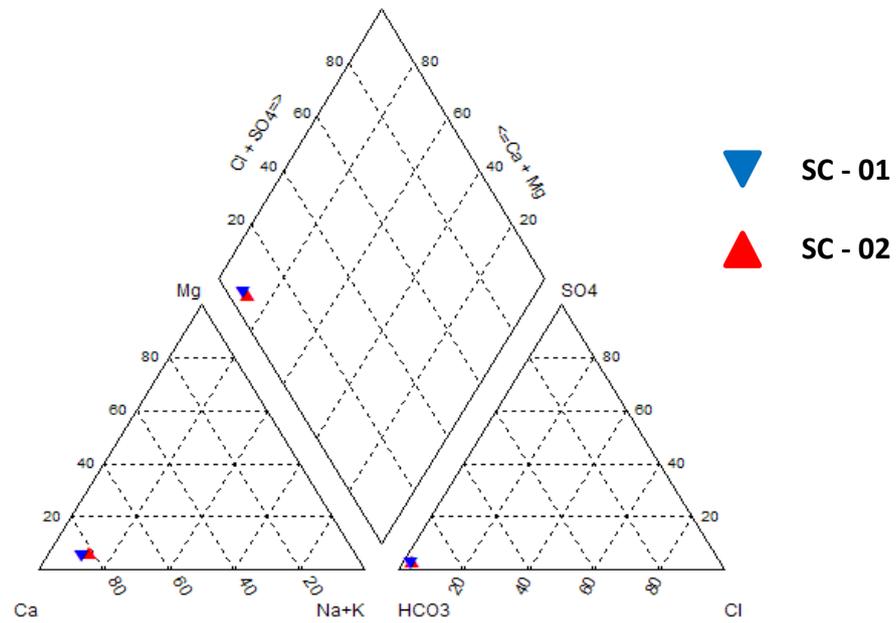


Diagrama de Piper – Janeiro de 2014

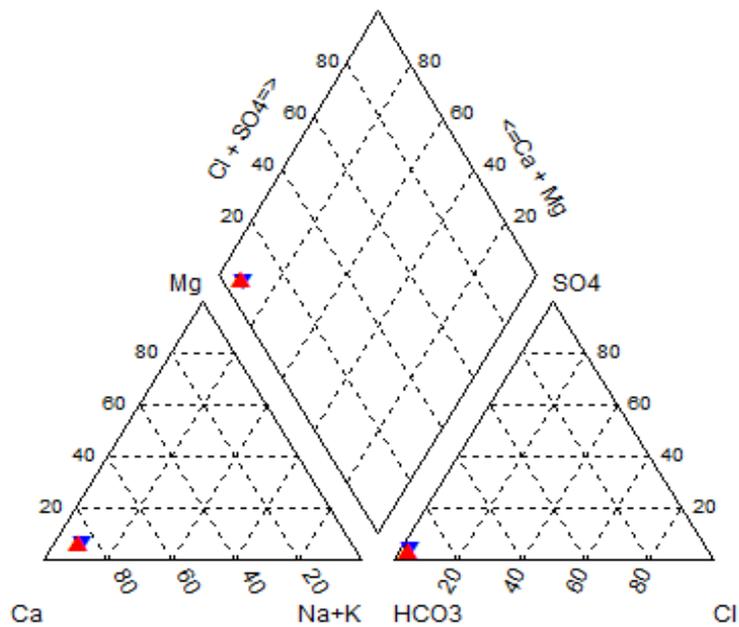


Figura 44 – Diagramas de Piper para as amostra d'água coletadas. Em ambas as datas e pontos coletados as águas são classificadas como cálcio-carbonatadas (Ca-HCO₃).

7. DISCUSSÕES

Segundo o modelo de ambientes deposicionais de tufas calcárias adaptado de Pedley (1990), Ford & Pedley (1996) e Carthew (2003a) e proposto por Corrêa (2011) (Tabela 5), o depósito Dezoito de Março se insere no contexto de uma tufa de vertente (*perched springline*) ou de nascente suspensa proximal, visto que apresenta seu desenvolvimento condicionado também a surgências de águas subterrâneas. Além disso, apresenta sua morfologia composta por tufas em cascata onde se desenvolvem as fácies fitohermal macrofítica (Fácies Fm) e espeleotema de cascata (Fácies Ec), que representam depósitos autóctones de tufas calcárias, que podem evoluir e formarem abrigos-sob-rocha. Enquanto que a jusante destas cascatas desenvolve-se represas de tufas, muitas vezes com formas convexas, onde são encontradas as fácies fitohermal estromatolítica (Fácies Fe), macrodetritica fitoclástica (Fácies Mf) e macrodetritica litoclástica (Fácies MI).

O processo de precipitação carbonática e formação das tufas calcárias podem ocorrer de duas maneiras. A primeira nas superfícies verticais representadas pelas tufas em cascata, onde são encontradas raízes pendentes, algas, musgos e outros variados tipos de macrófitas, que são encrustadas *in situ*, e a segunda quando devido à energia do fluxo d'água, materiais fitoclásticos podem ser transportados e acumulados em represas formadas próximas a essas fontes, depositando galhos, folhas, talos, raízes, etc., que posteriormente são cimentadas. Além disso, em momentos de enxurradas esporádicas, podem ser transportados litoclastos do embasamento ou até mesmo de tufas calcárias mais antigas, que também irão se depositar nestas represas em condições de menor energia, formando conglomerados maciços cimentados por carbonato, que constituem as tufas calcárias litoclástica (fácies MI).

Chafetz & Folk (1984) afirmam que a alta preservação fossilífera de restos vegetais em tufas calcárias está relacionada à elevada taxa de precipitação de CaCO_3 , da ordem de 0,1 a 0,5 mm/ano.

Também são observadas nítidas evidências da influência biológica na formação das tufas, constatada pela presença de texturas grumosas e laminadas tipicamente microbianas, além de vestígios de filamentos algálicos e bacterianos nas fácies Fe e Fm, o que demonstra que não seria um processo puramente químico, relacionado apenas à perda de CO_2 . Estes organismos também atuam na construção das represas de tufa (Figura 31), auxiliando a precipitação carbonática através da retirada de CO_2 da água para realização do seu metabolismo (CORRÊA, 2011).

Ademais, a presença de *shrubs* cristalinos com calcita espática fibro-radiada indica que a formação destas tufas, ao menos nas fácies Fe e Mf, estiveram relacionadas a ambientes pouco energéticos.

Considerando o clima da região e a sua influência na gênese destes carbonatos continentais, Corrêa (2011) sugere uma predominância de precipitação química e bioinfluenciada durante o inverno, devido à redução do fluxo d'água, que diminuiria o aporte de CaCO_3 , reduzindo a atividade microbiana e concentrando os íons de carbonato. Enquanto que no verão, haveria uma maior taxa de precipitação bioinduzida, pois a maior umidade nesta época favoreceria a proliferação de algas, musgos e cianobactérias. Seguindo esta linha de raciocínio, a análise hidrogeoquímica de água durante o inverno para fins comparativos, deverá apresentar valores mais elevados de ISc (índice de saturação de calcita), o que confirmaria a hipótese de uma maior precipitação físico-química durante o inverno.

Este fato explicaria a alternância de texturas mais porosas como as encontradas na fácies Mf, que então estariam sendo formadas principalmente durante o inverno, alternadas a texturas mais laminadas como a da fácies Fe, desenvolvidas principalmente durante o verão

(Figura 45). Admitindo-se está hipótese, durante o inverno aumenta a precipitação de cimento espático, enquanto que no verão haveria uma maior presença de micrita devido a uma maior participação microbiana na precipitação carbonática.

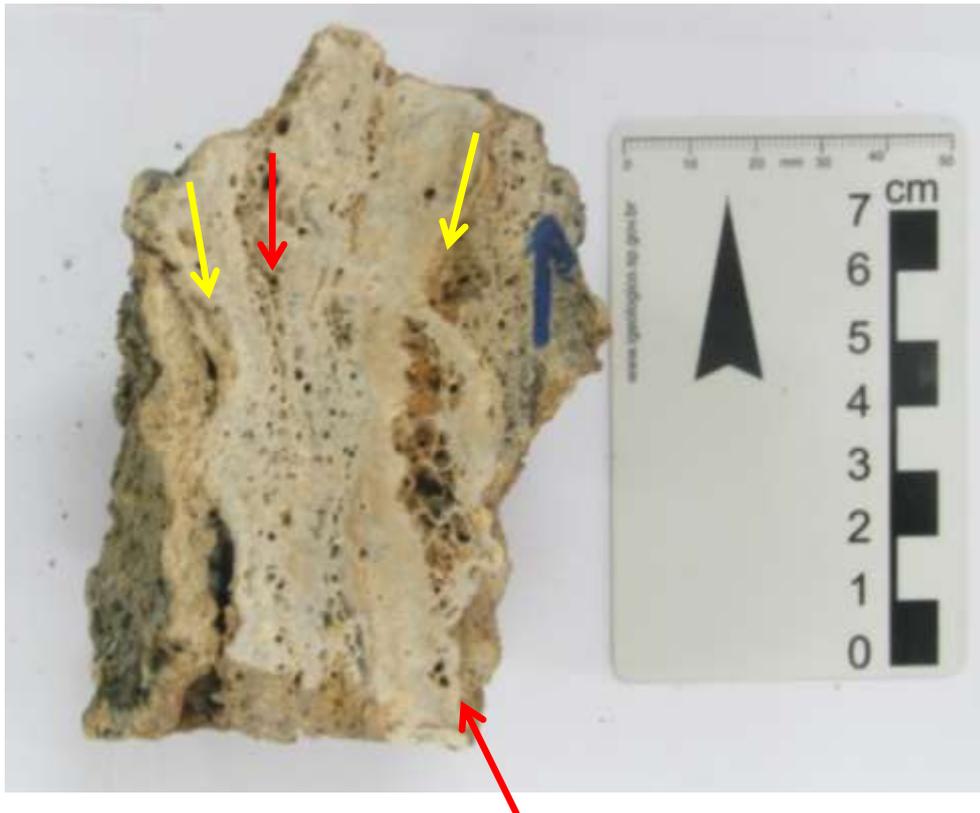


Figura 45 – Amostra MN185-RS mostrando uma alternância de texturas porosas (seta vermelha) e texturas laminadas (seta amarela).

Entretanto, vale ressaltar que a maior velocidade de vazão d'água poderia aumentar a turbidez da água, favorecendo a perda de CO_2 e a precipitação química de CaCO_3 , além de diluir os íons de carbonato e aumentar o aporte de material fitoclástico. Ford & Pedley (1996) afirmam que a variação de gradiente altimétrico e a consequente flutuação de energia de canais fluviais intensificam a precipitação do CaCO_3 , devido à combinação de processos físico-químicos, como a perda de CO_2 e a atividade microbológica, ocasionando a precipitação de tufas sob a forma de barragens, cachoeiras petrificadas (*petrified waterfalls*) e

formações estromatolíticas. Assim sendo, o clima regional exerce uma função fundamental na formação de depósitos de carbonatos continentais.

Os maiores depósitos tufáceos estão associados às tufas em cascata, o que sugere que o controle físico-químico predomina na deposição de tufas, com a perda de CO_2 devido à agitação da água. Chen *et al.* (2004) afirma que a predominância de depósitos tufáceos em altos declives deve-se a intensa perda de CO_2 por turbulência. Além disto, neste mesmo trabalho o autor afirma que a perda de CO_2 por turbulência é muito maior que a perda de CO_2 por atividade metabólica de seres vivos. A seção proposta pela Figura 19 destaca que os maiores depósitos tufáceos estão relacionados aos locais com maiores desníveis topográficos.

Além de considerar as condições climáticas nos processos de dissolução e precipitação destes carbonatos continentais, de acordo com o que foi explicitado no item 6.1, deve-se levar em consideração também o contexto geológico e geomorfológico que envolve a gênese destes depósitos. As condições encontradas na Serra do Cândido são favoráveis à deposição dos carbonatos, visto a abundância de soluções de CaCO_3 formadas a partir da dissolução dos mármores calcíticos do embasamento neoproterozóico. As feições tectônicas constituem outro fator importante, já que a contribuição de surgências de águas supersaturadas em CaCO_3 a partir de fraturas é fundamental na gênese destes carbonatos.

Para comparação entre as cinco litofácies propostas neste trabalho e as diferentes classificações de tufas calcárias e carbonatos propostas por Dunhan (1962), Embry & Klovan (1971), Pedley (1990) e Ford & Pedley (1996) foi elaborada a Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 – Comparação entre a classificação litofaciológica proposta neste trabalho e as demais classificações de tufas calcárias de Ford & Pedley (1996) (Tabela 1) e Pedley (1990) (Tabela 2) e de carbonatos de Embry & Klovan (1971) (Tabela 4) e Dunhan (1962) (Tabela 3).

Fagundes (2014)	Ford & Pedley (1996)	Pedley (1990)	Embry & Klovan (1971)	Dunhan (1962)
Tufa fitohermal estromatolítica	Tufa fitohermal do tipo estromatolítica	Tufa fitohermal <i>boundstone</i>	<i>Bindstone</i>	<i>Boundstone</i>
Tufa fitohermal macrofítica	Tufa fitohermal com macrofitas recobertas por cimento micrítico	Tufa fitohermal <i>framestone</i>	<i>Bafflestone</i> ou <i>framestone</i>	<i>Boundstone</i>
Tufa macrodetrítica fitoclástica	Tufa macrodetrítica fitoclástica	Tufa fitoclástica	<i>Rudstone</i>	<i>Packstone</i>
Tufa macrodetrítica litoclástica	Tufa macrodetrítica litoclástica		<i>Rudstone</i>	<i>Packstone</i>
Tufa espeleotema de cascata			<i>Bafflestone</i> ou <i>framestone</i>	<i>Boundstone</i>

Com os parâmetros medidos em campo e as análises das concentrações de cátions e ânions feitas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC-RIO (LAGAGUAS), pôde-se calcular parâmetros derivados importantes para caracterização dos processos deposicionais.

As águas analisadas apresentam índice de saturação baixo mas positivos, o que indica que a água está supersaturada no mineral calcita e, portanto, com potencial para deposição deste mineral. A variação do índice de saturação em calcita (ISc) ao longo da drenagem mostra que a jusante, no ponto SC-02, o valor do ISC é maior, o que significa que a água é mais rica em CaCO_3 , o que pode estar relacionado a influência da nascente de água subterrânea a partir de fratura neste ponto.

Os diagramas de Piper mostram que a drenagem apresenta águas cálcio-carbonatadas e, que se extrapolada para as demais nascentes cársticas da Serra do Cândido, pode-se inferir

que estas fornecem águas ricas em CaCO_3 , o que favorece a ocorrência de depósitos tufáceos ao longo de toda a serra.

Devido a grande quantidade de depósitos inativos de tufa ao longo do depósito, fora da drenagem atual, infere-se que as condições deposicionais pretéritas eram semelhantes ou mais favoráveis à precipitação carbonática que as condições atuais.

8. CONCLUSÕES

- 1) O depósito Dezoito de Março se insere no contexto de uma tufa de vertente (*perched springline*) ou de nascente suspensa proximal.
- 2) Nos locais de maiores desníveis topográficos e com contribuição de surgência de águas supersaturadas em CaCO_3 a partir de fraturas desenvolvem-se os maiores depósitos tufáceos.
- 3) Fatores climáticos são os principais responsáveis pela intercalação das texturas porosas da fácies Mf e laminadas da fácies Fe. Essa alternância sugere que a precipitação carbonática é constante durante todo o ano, mas com diferentes características texturais impostas por processos de precipitação físico-químicos, bioinfluenciados ou bioinduzidos.
- 4) A participação biológica é fundamental na gênese destes carbonatos e ocorrem na forma de texturas grumosas e laminadas na fácies Fe.
- 5) As fácies Fm e Ec (autóctones) estão associadas as tufas em cascata, enquanto que as fácies Mf e MI (alóctones) e Fe (autóctone) ocorrem nas represas de tufas formadas a jusante destas cascatas.
- 6) Fácies MI está associada a momentos de enxurrada na serra.
- 7) Não foram encontrados análogos à fácies Ec na literatura.

- 8) Os índices de saturação em calcita positivos indicam que no momento está ocorrendo precipitação deste mineral e, conseqüentemente, há depósitos ativos de tufas calcárias.

- 9) Novos estudos acadêmicos na Serra do Cândido são fundamentais para que haja uma preservação das tufas como importante patrimônio geológico do tipo sedimentar (fácies e estruturas) e paleoambiental (tufa de vertente), com valor científico, didático e paisagístico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. & BRITO NEVES, B. B. *The upper precambrian of South America*. Boletim do Instituto de Geociências da USP, 7:45-80, São Paulo/SP. 1976.
- ALMEIDA, L. H. S. Caracterização geológica e hidrogeológica de tufas da Serra do André Lopes, municípios de Eldorado e Barra do Turvo (SP). (Monografia). Curso de graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- ANDREWS, J. E. & BRASIER, A. T. *Seasonal records of climatic change in annually laminated tufas: short review and future prospects*. *Journal of Quaternary Science*. 20(5): 411-421. 2005.
- AULER, A. & SMART, P. *Late Quaternary paleoclimate in semiarid Northeastern Brazil from U-series dating travertines and water table spliothems*. *Quaternary Research*, n. 55, p. 159-167. 2001.
- BICALHO, C. C. Noções básicas de espeleologia. Apostila do Curso Básico de Espeleologia do Espeleo Grupo de Brasília. 2003.
- BOGGIANI, P. C. & COIMBRA, A. M. *Quaternary limestone of Pantanal area, Brazil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.67, n.3, p.343-349. 1995.
- BOGGIANI, P. C.; COIMBRA, A. M.; GESICKI, A. L.; SIAL, A. N.; FERREIRA, V. P.; RIBEIRO, F. B. & FLEXOR, J. M. Tufas Calcárias da Serra da Bodoquena. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M. & BERBERT-BORN, M. (Ed.). Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Brasília: DNPM/CPRM – Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), v.1, p.249-259. 2002.
- BOGGIANI, P. C.; SIAL, A.; RIBEIRO, F.; FLEXOR, J.; ROQUE, A. & FERREIRA, V. *Paleoenvironmental indications from stable isotopes in freshwater Quaternary limestones in the Bodoquena Plateau, Central South America*. In: Simpósio Sulamericano de Geologia Isotópica, Cidade de Villa Carlos Paz, v.1, p.380-382. 1999.
- BRANCACCIO, L.; D'ARGENIO, B.; FERRERI, V.; DAMIANO, S.; TURI, B. & PREITE, M. M. *Caratteri Tessiturali e Geochimici dei Travertini di Rocchetta a Volturno (Molise)*. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, v.105, p.265-277. 1986.
- BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 32. Folha Rio de Janeiro/Vitória (SF 23/24) – Vegetação, p. 553-608. Departamento de Produção Mineral. Rio de Janeiro. 1983.
- BUCCINO, G.; D'ARGENIO, B.; FERRERI, V.; BRANCACCIO, I.; FERRERI, M.; PANICHI, C. & STANZIONE, D. *I Travertini della bassa valle del Tanagro (Campania)*. *Studio Geomorfologico, Sedimentologico e Geochimico*. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, v.97, p.617-646. 1978.

- CARMINATTI, M.; DIAS, J. & WOLFF, B. *From Turbidites to Carbonates: Breaking Paradigms in Deep Waters*. In: *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA. 2009.
- CARTHEW, K. D.; TAYLOR, M. P. & DRYSDALE, R. N. *Are current models of tufa sedimentary environments applicable to tropical system? A case of study from the Gregory river*. *Sedimentary Geology*. 162: 199-218. 2003a.
- CARTHEW, K. D.; TAYLOR, M. P. & DRYSDALE, R. N. *A environmental model of fluvial tufas in the monsoonal tropics, Barkly karst, northern Australia*. *Geomorphology*, v.73, p.78-100. 2006.
- CHAFETZ, H.S. & FOLK, R.L. *Travertines: depositional morphology and bacterially constructed constituents*. *Journal of Sedimentology and Petrology*, 54: 289-316. 1984.
- CHAFETZ, H. S. & GUIDRY, S. A. *Bacterial shrubs, crystal shrubs, and ray-crystal shrubs: bacterial vs. abiotic precipitation*. *Sedimentary Geology*, v. 126, p. 57-74. 1999.
- CHAFETZ, H. S.; RUSH, P. F. & UTECH, N. M. *Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates: an example from an active travertine system*. *Sedimentology*. 38(1): 107-126. 1991.
- CHEN, J.; ZHANG, D. D.; WANG, S.; XIAO, T.; HUANG, R. *Factors controlling tufa deposition in natural Waters at waterfall sites*. *Sedimentary Geology*, v. 166, p. 353-366. 2004.
- CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. *Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, v. 54, n. 2, p. 207-250. 1970.
- CORRÊA, D. *Geocronologia dos depósitos de tufa dos vales dos rios Salitre e Jacaré - Centro norte da Bahia: uma abordagem paleoclimática*. Monografia de graduação em Geografia. IGC/UFMG. 2004.
- CORRÊA, D. *Caracterização, Cronologia e Gênese das Tufas da Serra das Araras – Mato Grosso*. 79p. (Dissertação de Mestrado) – Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.
- CORRÊA, D. & AULER, A. S. *Caracterização, cronologia e gênese das tufas da Serra das Araras, Mato Grosso*. In: *Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 1.2006, Campo Grande (MS)*. Anais. Campo Grande (MS): Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.165-174. 2006.
- CORRÊA, D. & AULER, A. S. *Tufas calcárias da Serra das Araras (MT): um notável depósito sedimentar quaternário*. In: *Encontro Brasileiro de Estudos do Carste – 2, 2007, São Paulo*. Anais. São Paulo: Redspeleo Brasil, p.11. 2007.

- CORRÊA, E. C. C. Tufas Calcárias do Centro Norte Fluminense: Caracterização, contexto genético e cronologia / Eliza Cristina Celis Corrêa - Rio de Janeiro, 2011: UFRJ/IGEO, 2011. xiv, 104f., anexos, 29,7 cm. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal Fluminense - UFRJ, Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Geologia. 2011.
- DECHO, A. W. *Microbial exopolymer secretions in ocean environments: their role(s) in food webs and marine processes. Oceanography Marine Biology Annual Review.* 28: 73–154. 1990.
- DRM - MATOS, G. M. M.; FERRARI, P. G. & CAVALCANTE, J. C. Projeto Faixa Calcária Cordeiro-Cantagalo. Relatório Final, texto e mapas geológicos, Belo Horizonte, CPRM, 620 pp. 1980.
- DUNHAM, R. J. *Classification of carbonate rocks according to depositional texture.* Mem. Am. Assoc. Pet. Geol., 1: 108-121. 1962.
- EMBRY, A. F. & KLOVAN, J. E. *Late Devonian reef tracts on northeastern Banks Islands, Northwest Territories. Canadian Petrology and Geology Bulletin,* v.19, p.730-781. 1971.
- EMEIS, K. C.; RICHNOW, H. H. & KEMPE, S. Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. *Sedimentology.* 34(4): 595-609, 1987.
- FERRARI, A. L. A geologia do rifte da Guanabara (RJ) na sua porção centro-ocidental e sua relação com o embasamento Pré-Cambriano. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 36. Anais, v.6: 2858-2872. 1990.
- FILIPPOV, A., F. *Formations conditions of aragonite in some caves from Pester karst region, W. Rhodopes.* Ann. Sofia Univ., Geol. Geogr., v. 79, no. 1, p. 162-173. In: Bulgarian. 1990.
- FORD, T. D. *Tufa: a freshwater limestone. Geology Today.* 5(2): 60-63. 1989.
- FORD, T. D. & PEDLEY, H. M. *A review of tufa and travertine deposits of the world. Earth Science Reviews.* 41: 117-175. 1996.
- FORD, T. D. & WILLIAMS, P.W. *Karst Geomorphology and hidrology.* Londres: Unwin Hyman. 601p. 1989.
- GRADZINSKI, M. *Factors controlling growth of modern tufa: results of a field experiment.* In: PEDLEY, H.M. & ROPERSON, M. *Tufas and speleothems: Unravelling the Microbial and Physical controls.* Geologic Society, London, *Special Publications.* 2010.
- GUO, L. & RIDING, R. *Origin and Diagenesis of Quaternary Travertine shrub fabrics, Rapolano Terme, central Italy. Sedimentology,* v. 41, p. 499-520. 1994.
- HEILBRON, M. Evolução tectono-metamórfica da seção Bom Jardim de Minas (MG) - Barra do Piraí (RJ). Setor Central da Faixa Ribeira. Tese Doutorado. Instituto Geociências/Universidade de São Paulo, 268p. 1993.

HEILBRON, M.; TUPINAMBÁ, M.; ALMEIDA, J. C. H.; VALERIANO, C. M.; VALLADARES, C. S. & DUARTE, B. P. *New constraints on the tectonic organization and structural styles related to the Brasiliano Collage of the Central Segment of Ribeira Belt, SE Brazil*. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS*, 14, Ouro Preto, p. 15-17. 1998.

HEILBRON, M., MOHRIAK, W. V., VALERIANO, C. M., MILANI, E. J., ALMEIDA, J., TUPINAMBÁ, M. *From collision to extension: the roots of the southeastern continental margin of Brazil*. In: TALWANI, M. & MOHRIAK, W.U. (Orgs.), *Atlantic Rifts and Continental Margins*. Washington DC, EUA: *American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series*, v. 115, p. 1-34. 2000.

HEILBRON, M. & MACHADO, N. *Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira Orogen (SE Brazil)*. *Precambrian Research*, v. 125, p. 87-112. 2003.

HEILBRON, M.; SOARES, A. C. P.; CAMPOS, N.; SILVA, L. C.; TROUW, R.; JANASI, V. *Província Mantiqueira*. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R. & BRITO NEVES, B. B. (Orgs.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda., 1ª ed., v. 1, p. 203-234. 2004a.

HEM, J. D. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Third Editio*. U. S. Geological Survey. 1985.

HILL, C. & FORTI P. *Cave Minerals of the World. Second Edition*. National Speleological Society, Inc. EUA. 1997.

HYPOLITO, R., ANDRADE, S., SILVA, L. H. e NASCIMENTO, S. C. *Alcalinidade – metodologia para determinação em campo*. *Revista Analytica*, Junho/Julho. 2008.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990*. Estação Meteorológica de Cordeiro – cód. 83718. Brasília: INMET. 2009.

JONES, B. & RENAUT, R. W. *Calcareous Spring Deposits in Continental Settings*. In: Alonso-Zarza, A. M. & Tanner, L. H. (Ed.) *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Process. Developments in Sedimentology*, v. 61, p. 177-224. Amsterdam: Elsevier. 2010.

KING L.C. *A geomorfologia do Brasil Oriental*. *Revista Brasileira de Geografia*, 18:147-265. 1956.

KÖPPEN, W. *Climatologia: um estudo dos climas da Terra*. México: Fondo de Cultura Econômica. 478p. 1948.

LANGMUIR, D. *The Geochemistry of some Carbonate Groundwaters in Central Pennsylvania*. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v. 35 (10), p. 1023-1045. 1971.

- LEAL, C. F. N. B. O distrito cárstico da Região Centro-Norte Fluminense e sua inserção no cenário espeleológico nacional. Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro. 2012
- LIPPMAN F. *Versuche zur Aufklärung der Bildungsbedingungen von Calcit und Aragonit. Fortschritte der Mineralogie* 38, 156–161. 1960.
- MACHADO, N.; VALLADARES, C.; HEILBRON, M.; VALERIANO, C. *U-Pb Geochronology of the central Ribeira belt (Brazil) and implication for the evolution of the Brazilian Orogeny. Precambrian Research*, v. 79, p. 347-361. 1996.
- MERKEL, B. J., PLANER-FRIEDRICH, B., *Groundwater Geochemistry. A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. 2008.
- NICOLA, M. Tufas Calcárias do Caxangá, Município de Itaocara, RJ. 63 p. (Monografia). Curso de especialização em Geologia do Quaternário, Dept. de Geologia e Paleontologia, Museu Nacional, UFRJ. 2006.
- NIMER, E.; PINHEIRO-FILHO, A. A.; AMADOR, E .S. & ARAÚJO NETO, M. D. Climatologia da região Sudeste. In: NIMER, E. Climatologia do Brasil. IBGE/DERNA, Rio de Janeiro, p.265-313. 1979.
- OLIVEIRA, E. C. Tufas Calcárias da Serra da Bodoquena, MS. 90p. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009
- OLIVEIRA, E.C. Rochas carbonáticas continentais (Quaternário) do Pantanal Matogrossense e adjacências. Tese apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Geologia. São Paulo. 2013.
- OLIVEIRA, E. C.; UTIDA, G.; BOGGIANI, P. C. & PETRI, S. A Formação Xaraiés e as tufas calcárias da Serra da Bodoquena, MS. In: Congresso Brasileiro de Geologia 44, 2008b, Curitiba. Anais. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, p.991. 2008b.
- ORDÓÑEZ, S. & GARCIA DEL CURA, M. A. *Recent and Tertiary fluvial carbonates in central Spain*. In: COLLINSON, J. D. & LEWIN, J. *Ancient and Modern Fluvial Systems*. v.6, p. 485-497. 1983.
- PAPATERRA, G. E. Z. P. Pré-sal: conceituação geológica sobre uma nova fronteira exploratória no Brasil. 81 p. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2010.
- PEDLEY, H. M. *Classification and environmental models of cool freshwater tufas. Sedimentology Geology*. 68: 143-154. 1990.

PEDLEY, H. M.; ANDREWS, J.; ORDONEZ, S.; GARCIA DEL CURA, M. A.; MARTIN, J. A. G. & TAYLOR D. *Does climate control the morphological fabric of freshwater carbonates? A comparative study of Holocene barrage tufas from Spain and Britain. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.121, n.3, p.239-257. 1996.

PEIXOTO, C. & HEILBRON, M. Geologia da Klippe Italva na região entre Cantagalo e Itaocara, Nordeste do Estado do Rio de Janeiro. *Geociências*, 29: 277 – 289. 2010.

PENTECOST, A. & VILES, H. *A review and reassessment of travertine classification. Géographie physique et Quaternaire*. 48(3): 305-314. 1994.

PENTECOST A. *Microdistribution of algae in an Italian thermogene travertine. Archiv für Hydrobiologie*. 152: 439-449. 2001.

PETTYJOHN, F. J. *Sedimentary Rocks*. 2 ed. Nova York: Harper. 1957.

RAGATKY, C. D.; TUPINAMBÁ, M.; MARINS, G. S. & DUARTE, B. P. *Chemical characterization of metabasites from the Italva Group at the central Ribeira belt and its tectonic implications. In: SBG, Simp. Nac. de Estudos Tectônicos, 9, Boletim de Resumos*, p. 40-42. 2003.

RAMOS, R. R. C.; BRAGA, M. V. C.; OZANICK, C.; JATOBÁ, O. & CASTRO, J. W. A. Primeiro registro de tufas calcárias no estado do Rio de Janeiro. *Anais do X Congresso Brasileiro dos Estudos do Quaternário – ABEQUA*. 2005.

RICCOMINI, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo, 256p. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 1989.

SAMPAIO, J. A. & ALMEIDA, S. L. M., 2005. Calcário e Dolomito. Capítulo 15. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2005-132-00.pdf>. Acessado em 07-12-2013.

SANT'ANNA NETO, J.L. Decálogo da Climatologia do Sudeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Climatologia*. 1(1). 2005.

SCHMITT, R. S.; TROUW, R. A. J.; VAN SCHMUS, W. R. & PIMENTEL, M. M. *Late amalgamation in the central part of Western Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collisional orogeny in the Ribeira belt (SE Brazil). Precambrian Research*, v. 133, p. 29-61. 2004.

STAL, L. J. Tansley Review n° 84: *Physiological ecology of cyanobacteria in microbial mats and other communities. New Phytology*. 131: 1-32. 1995.

TROUW R.; HEILBRON M.; RIBEIRO A.; PACIULLO F.; VALERIANO C.; ALMEIDA J.; TUPINAMBÁ M. & ANDREIS R. *The Central Segment of the Ribeira Belt. In: U. CORDANI, E.; MILANI, A.; THOMAZ FILHO & D. CAMPOS, (eds.) Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, CPRM, p. 287-310. 2000.

TUCKER, M. E. *Carbonate Sedimentology*. Oxford, Inglaterra: Blackwell Publishing, 482p. 1990.

TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; DUARTE, B. P.; SILVA, L. G. E.; NOGUEIRA, J. R.; VALLADARES, C. S.; ALMEIDA, J. C. H.; EIRALDO, L. G.; MEDEIROS, S. R.; ALMEIDA, C. G.; MIRANDA, A. W. A. & RAGATKY, D. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Geonomos*, v. 15, p. 67-79. 2007.

VENABLES, J. A.; SPILLER, D. T. & HANBUCKEN, M. *Nucleation and growth of thin films. Reports on Progress in Physics*, v.47, p. 399-459. 1984.

WHITE, W. B. *Geomorphology and Hydrology of Karst terrains*. Oxford, Oxford University Press.1988.

WRIGHT, V. P. *Lacustrine carbonates in rift settings: the interaction of volcanic and microbial processes on carbonate deposition*. Geological Society, London, Special Publications, v.370. 2012.

ZHANG, D.D., ZHANG, Y.J. & CHENG, X. *Physical mechanisms of river waterfall tufa (travertine) formation*. *Journal of Sedimentology Research*. 71: 201–216. 2001.

Anexo 1 – Ponto SC – 01. Coleta de outubro de 2013. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Parâmetros Físicos e Físico-químicos							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Aspecto Natural	Límpido e Incolor	-	N.A.	Visual	-	-	-
Odor a Frio	Ausente	-	N.A.	Sensorial	-	-	-
Sólidos em Suspensão	Ausente	-	N.A.	Visual	-	-	-
Cor Aparente	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	15 uH	-
Cor Real	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	-	-
Turbidez	< 1	uT	< 1	MB-3227-90	-	5 uT	-
pH a 25°C	7,600	-	N.A.	ASTM D1293-12	-	-	-
Condutividade a 25°C	496	$\times 10^{-6}$ mhos cm^{-1}	< 1,3	ASTM D1125-95	-	-	-
Sólidos Totais Dissolvidos	324	mg L^{-1} , calc.	< 11,2	Calculado	-	1000 mg L^{-1}	1000 mg L^{-1}
Dureza Total em CaCO_3	231	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	500 mg L^{-1}	-
Dureza Permanente em CaCO_3	-	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Dureza Temporária em CaCO_3	231	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Alcalinidade Total em CaCO_3	256	mg L^{-1}	< 1,00	ASTM D1067-11	-	-	-
Carbonato em CO_3^{2-}	< 1,50	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Bicarbonato em HCO_3^-	313	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Ânions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L^{-1})		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Fluoreto (F^-)	0,27	mg L^{-1}	< 0,01	ASTM 4327-11	-	1,50	1,50
Cloreto (Cl^-)	5,13		< 0,01		-	250	250
Brometo (Br^-)	0,037		< 0,01		-	-	-
Nitrato (NO_3^-)	0,38		< 0,01		50,0	10*	10*
Fosfato (PO_4^{3-})	2,60		< 0,01		-	-	-
Sulfato (SO_4^{2-})	8,14		< 0,01		-	250	250

Anexo 2 – Ponto SC – 01. Coleta de outubro de 2013. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Cátions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Sódio (Na)	13,7	mg L ⁻¹	< 0,01	ASTM D6919-09	-	200	200
Potássio (K)	2,05		< 0,01		-	-	-
Cálcio (Ca)	85,9		< 0,01		-	-	-
Magnésio (Mg)	4,07		< 0,01		-	-	-
Metais							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Alumínio (Al)	0,029	mg L ⁻¹	< 0,001	EPA 200-8	-	0,200	0,200
Antimônio (Sb)	0,001		< 0,001		0,005	0,005	0,005
Arsênio (As)	< 0,01		< 0,01		0,010	0,010	0,010
Bário (Ba)	0,051		< 0,001		0,700	0,700	0,700
Berílio (Be)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,004
Boro (B)	< 0,5		< 0,5		5,000	-	0,500
Cádmio (Cd)	< 0,001		< 0,001		0,003	0,005	0,005
Chumbo (Pb)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Cobalto (Co)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Cobre (Cu)	0,001		< 0,001		1,000	2,000	2,000
Cromo (Cr)	0,002		< 0,001		0,050	0,050	0,050
Escândio (Sc)	0,004		< 0,001		-	-	-
Estanho (Sn)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Estrôncio (Sr)	0,38		< 0,001		-	-	-
Ferro (Fe)	0,032		< 0,01		-	0,300	0,300
Lítio (Li)	0,001		< 0,001		-	-	-
Manganês (Mn)	0,012		< 0,001		0,500	0,100	0,100
Merúrio (Hg)	< 0,001		< 0,001		0,001	0,001	0,001
Molibdênio (Mo)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,070
Níquel (Ni)	0,001		< 0,001		0,020	0,070	0,020
Prata (Ag)	-		< 0,001		-	-	0,100
Selênio (Se)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Silício (SiO ₂)	25,8		< 2,1		-	-	-
Titânio (Ti)	0,003		< 0,001		-	-	-
Tungstênio (W)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Urânio (U)	0,002		< 0,001		-	0,030	0,015
Vanádio (V)	0,003		< 0,001		-	-	0,050
Zinco (Zn)	0,027		< 0,001		-	5,000	5,000

Anexo 3 – Ponto SC – 02. Coleta de outubro de 2013. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Parâmetros Físicos e Físico-químicos							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Aspecto Natural	Límpido e Incolor	-	N.A.	Visual	-	-	-
Odor a Frio	Ausente	-	N.A.	Sensorial	-	-	-
Sólidos em Suspensão	Ausente	-	N.A.	Visual	-	-	-
Cor Aparente	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	15 uH	-
Cor Real	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	-	-
Turbidez	< 1	uT	< 1	MB-3227-90	-	5 uT	-
pH a 25°C	7,813	-	N.A.	ASTM D1293-12	-	-	-
Condutividade a 25°C	514	$\times 10^{-6}$ mhos cm^{-1}	< 1,3	ASTM D1125-95	-	-	-
Sólidos Totais Dissolvidos	336	mg L^{-1} , calc.	< 11,2	Calculado	-	1000 mg L^{-1}	1000 mg L^{-1}
Dureza Total em CaCO_3	246	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	500 mg L^{-1}	-
Dureza Permanente em CaCO_3	-	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Dureza Temporária em CaCO_3	246	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Alcalinidade Total em CaCO_3	269	mg L^{-1}	< 1,00	ASTM D1067-11	-	-	-
Carbonato em CO_3^{2-}	< 1,50	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Bicarbonato em HCO_3^-	328	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Ânions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L^{-1})		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Fluoreto (F^-)	0,24	mg L^{-1}	< 0,01	ASTM 4327-11	-	1,50	1,50
Cloreto (Cl^-)	5,18		< 0,01		-	250	250
Brometo (Br^-)	0,040		< 0,01		-	-	-
Nitrato (NO_3^-)	0,14		< 0,01		50,0	10*	10*
Fosfato (PO_4^{3-})	2,48		< 0,01		-	-	-
Sulfato (SO_4^{2-})	8,00		< 0,01		-	250	250

Anexo 4 – Ponto SC – 02. Coleta de outubro de 2013. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Cátions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Sódio (Na)	11,9	mg L ⁻¹	< 0,01	ASTM D6919-09	-	200	200
Potássio (K)	1,69		< 0,01		-	-	-
Cálcio (Ca)	92,3		< 0,01		-	-	-
Magnésio (Mg)	3,89		< 0,01		-	-	-
Metais							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Alumínio (Al)	0,058	mg L ⁻¹	< 0,001	EPA 200-8	-	0,200	0,200
Antimônio (Sb)	< 0,001		< 0,001		0,005	0,005	0,005
Arsênio (As)	< 0,01		< 0,01		0,010	0,010	0,010
Bário (Ba)	0,054		< 0,001		0,700	0,700	0,700
Berílio (Be)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,004
Boro (B)	< 0,5		< 0,5		5,000	-	0,500
Cádmio (Cd)	< 0,001		< 0,001		0,003	0,005	0,005
Chumbo (Pb)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Cobalto (Co)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Cobre (Cu)	0,001		< 0,001		1,000	2,000	2,000
Cromo (Cr)	0,001		< 0,001		0,050	0,050	0,050
Escândio (Sc)	0,003		< 0,001		-	-	-
Estanho (Sn)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Estrôncio (Sr)	0,41		< 0,001		-	-	-
Ferro (Fe)	< 0,01		< 0,01		-	0,300	0,300
Lítio (Li)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Manganês (Mn)	0,004		< 0,001		0,500	0,100	0,100
Merúrio (Hg)	< 0,001		< 0,001		0,001	0,001	0,001
Molibdênio (Mo)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,070
Níquel (Ni)	0,001		< 0,001		0,020	0,070	0,020
Prata (Ag)	-		< 0,001		-	-	0,100
Selênio (Se)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Silício (SiO ₂)	24,6		< 2,1		-	-	-
Titânio (Ti)	0,002		< 0,001		-	-	-
Tungstênio (W)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Urânio (U)	0,002		< 0,001		-	0,030	0,015
Vanádio (V)	0,002		< 0,001		-	-	0,050
Zinco (Zn)	0,043		< 0,001		-	5,000	5,000

Anexo 5 - Ponto SC – 01. Coleta de janeiro de 2014. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Parâmetros Físicos e Físico-químicos							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Aspecto Natural	Límpido e Amarelado	-	N.A.	Visual	-	-	-
Odor a Frio	Ausente	-	N.A.	Sensorial	-	-	-
Sólidos em Suspensão	Ausente	-	N.A.	Visual	-	-	-
Cor Aparente	11,6	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	15 uH	-
Cor Real	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	-	-
Turbidez	12	uT	< 1	MB-3227-90	-	5 uT	-
pH a 25°C	8,100	-	N.A.	ASTM D1293-12	-	-	-
Condutividade a 25°C	497	$\times 10^{-6}$ mhos cm^{-1}	< 1,3	ASTM D1125-95	-	-	-
Sólidos Totais Dissolvidos	325	mg L^{-1} , calc.	< 11,2	Calculado	-	1000 mg L^{-1}	1000 mg L^{-1}
Dureza Total em CaCO_3	252	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	500 mg L^{-1}	-
Dureza Permanente em CaCO_3	-	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Dureza Temporária em CaCO_3	252	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Alcalinidade Total em CaCO_3	254	mg L^{-1}	< 1,00	ASTM D1067-11	-	-	-
Carbonato em CO_3^{2-}	< 1,50	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Bicarbonato em HCO_3^-	310	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Ânions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L^{-1})		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Fluoreto (F^-)	0,28	mg L^{-1}	< 0,01	ASTM 4327-11	-	1,50	1,50
Cloreto (Cl^-)	5,12		< 0,01		-	250	250
Brometo (Br^-)	0,10		< 0,01		-	-	-
Nitrato (NO_3^-)	0,53		< 0,01		50,0	10*	10*
Fosfato (PO_4^{3-})	0,38		< 0,01		-	-	-
Sulfato (SO_4^{2-})	11,6		< 0,01		-	250	250

Anexo 6 – Ponto SC – 01. Coleta de janeiro de 2014. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Cátions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Sódio (Na)	9,55	mg L ⁻¹	< 0,01	ASTM D6919-09	-	200	200
Potássio (K)	2,64		< 0,01		-	-	-
Cálcio (Ca)	93,4		< 0,01		-	-	-
Magnésio (Mg)	4,53		< 0,01		-	-	-
Metais							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Alumínio (Al)	0,031	mg L ⁻¹	< 0,001	EPA 200-8	-	0,200	0,200
Antimônio (Sb)	0,001		< 0,001		0,005	0,005	0,005
Arsênio (As)	< 0,01		< 0,01		0,010	0,010	0,010
Bário (Ba)	0,056		< 0,001		0,700	0,700	0,700
Berílio (Be)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,004
Boro (B)	< 0,5		< 0,5		5,000	-	0,500
Cádmio (Cd)	< 0,001		< 0,001		0,003	0,005	0,005
Chumbo (Pb)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Cobalto (Co)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Cobre (Cu)	0,002		< 0,001		1,000	2,000	2,000
Cromo (Cr)	0,002		< 0,001		0,050	0,050	0,050
Escândio (Sc)	0,004		< 0,001		-	-	-
Estanho (Sn)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Estrôncio (Sr)	0,39		< 0,001		-	-	-
Ferro (Fe)	0,10		< 0,01		-	0,300	0,300
Lítio (Li)	0,001		< 0,001		-	-	-
Manganês (Mn)	0,048		< 0,001		0,500	0,100	0,100
Merúrio (Hg)	< 0,001		< 0,001		0,001	0,001	0,001
Molibdênio (Mo)	0,001		< 0,001		-	-	0,070
Níquel (Ni)	0,002		< 0,001		0,020	0,070	0,020
Prata (Ag)	-		< 0,001		-	-	0,100
Selênio (Se)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Silício (SiO ₂)	25,0		< 2,1		-	-	-
Titânio (Ti)	0,003		< 0,001		-	-	-
Tungstênio (W)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Urânio (U)	0,002		< 0,001		-	0,030	0,015
Vanádio (V)	0,003		< 0,001		-	-	0,050
Zinco (Zn)	0,040		< 0,001		-	5,000	5,000

Anexo 7 - Ponto SC – 02. Coleta de janeiro de 2014. Parâmetros Físicos e Físico-químicos e concentração de ânions por Cromatografia de Íons. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Parâmetros Físicos e Físico-químicos							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Aspecto Natural	Límpido e Incolor	-	N.A.	Visual	-	-	-
Odor a Frio	Ausente	-	N.A.	Sensorial	-	-	-
Sólidos em Suspensão	Presente	-	N.A.	Visual	-	-	-
Cor Aparente	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	15 uH	-
Cor Real	< 0,2	uH	< 0,2	NBR 13798-97	-	-	-
Turbidez	<1	uT	< 1	MB-3227-90	-	5 uT	-
pH a 25°C	8,034	-	N.A.	ASTM D1293-12	-	-	-
Condutividade a 25°C	516	$\times 10^{-6}$ mhos cm^{-1}	< 1,3	ASTM D1125-95	-	-	-
Sólidos Totais Dissolvidos	337	mg L^{-1} , calc.	< 11,2	Calculado	-	1000 mg L^{-1}	1000 mg L^{-1}
Dureza Total em CaCO_3	266	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	500 mg L^{-1}	-
Dureza Permanente em CaCO_3	-	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Dureza Temporária em CaCO_3	266	mg L^{-1}	< 0,10	Calculado	-	-	-
Alcalinidade Total em CaCO_3	284	mg L^{-1}	< 1,00	ASTM D1067-11	-	-	-
Carbonato em CO_3^{2-}	< 1,50	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Bicarbonato em HCO_3^-	346	mg L^{-1}	< 1,50	ASTM D1067-11	-	-	-
Ânions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L^{-1})		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Fluoreto (F^-)	0,23	mg L^{-1}	< 0,01	ASTM 4327-11	-	1,50	1,50
Cloreto (Cl^-)	5,66		< 0,01		-	250	250
Brometo (Br^-)	0,097		< 0,01		-	-	-
Nitrato (NO_3^-)	0,54		< 0,01		50,0	10*	10*
Fosfato (PO_4^{3-})	0,11		< 0,01		-	-	-
Sulfato (SO_4^{2-})	8,78		< 0,01		-	250	250

Anexo 8 – Ponto SC – 02. Coleta de janeiro de 2014. Concentração de cátions por Cromatografia de Íons e metais. Análises realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Águas da PUC – Rio.

Cátions por Cromatografia de Íons							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Sódio (Na)	9,09	mg L ⁻¹	< 0,01	ASTM D6919-09	-	200	200
Potássio (K)	1,78		< 0,01		-	-	-
Cálcio (Ca)	99,3		< 0,01		-	-	-
Magnésio (Mg)	4,31		< 0,01		-	-	-
Metais							
Ensaio	Valor	Unidade	LQ	Metodologia	VMP (mg L ⁻¹)		
					RDC 274	Port. MS 1294	CONAMA 396
Alumínio (Al)	0,066	mg L ⁻¹	< 0,001	EPA 200-8	-	0,200	0,200
Antimônio (Sb)	< 0,001		< 0,001		0,005	0,005	0,005
Arsênio (As)	< 0,01		< 0,01		0,010	0,010	0,010
Bário (Ba)	0,054		< 0,001		0,700	0,700	0,700
Berílio (Be)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,004
Boro (B)	< 0,5		< 0,5		5,000	-	0,500
Cádmio (Cd)	< 0,001		< 0,001		0,003	0,005	0,005
Chumbo (Pb)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Cobalto (Co)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Cobre (Cu)	0,002		< 0,001		1,000	2,000	2,000
Cromo (Cr)	0,002		< 0,001		0,050	0,050	0,050
Escândio (Sc)	0,004		< 0,001		-	-	-
Estanho (Sn)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Estrôncio (Sr)	0,42		< 0,001		-	-	-
Ferro (Fe)	< 0,01		< 0,01		-	0,300	0,300
Lítio (Li)	0,001		< 0,001		-	-	-
Manganês (Mn)	0,007		< 0,001		0,500	0,100	0,100
Merúrio (Hg)	< 0,001		< 0,001		0,001	0,001	0,001
Molibdênio (Mo)	< 0,001		< 0,001		-	-	0,070
Níquel (Ni)	0,002		< 0,001		0,020	0,070	0,020
Prata (Ag)	-		< 0,001		-	-	0,100
Selênio (Se)	< 0,001		< 0,001		0,010	0,010	0,010
Silício (SiO ₂)	26,3		< 2,1		-	-	-
Titânio (Ti)	0,003		< 0,001		-	-	-
Tungstênio (W)	< 0,001		< 0,001		-	-	-
Urânio (U)	0,002		< 0,001		-	0,030	0,015
Vanádio (V)	0,002		< 0,001		-	-	0,050
Zinco (Zn)	0,032		< 0,001		-	5,000	5,000