

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**Reinterpretação dos domos de Anhembi, SP:
evidência de exsudação de metano durante o
Permiano da Bacia do Paraná**

Aluno:

Murilo Amaral

Orientador:

Prof. Dr. Lucas Verissimo Warren

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Bacharel em Geologia

Rio Claro - SP
2016

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof^o Dr. Lucas Warren, pelos grandes ensinamentos, pela paciência, pelas construtivas e precisas críticas, pela amizade e por cada risada dada tomando uma boa cerveja. Aos amigos Juliana Okubo, Michele Andriolli, Lucas Inglez que auxiliaram o desenvolvimento do trabalho, com parceria e amizade.

Aos professores Rosemarie Rohn, George Luzivotto, Ervino Ziemath que deram apoio e ajuda, sempre com boa vontade.

À minha mãe Maria Luiza e ao meu irmão Tulio que são tudo o que eu tenho de mais valioso na vida e sempre me deram forças para seguir em frente e concluir meus desafios com amparo, amor e direção. São, sem dúvidas, o meu mais firme alicerce.

Ao meu pai Netto e à minha segunda mãe Flávia, que me trouxeram apoio, amor e amizade nessa caminhada.

Aos meus avós paternos, Antonio Augusto e Marisa Pomelli, que sempre me amaram com intensidade e foram meu porto seguro. Eles não estão mais comigo, mas os carrego para sempre em meu coração e memória.

Aos meus avós maternos, Costa e Rita, que sempre deram apoio, amor e muito afeto.

Aos amigos Amanda (He-man), Tião, Butão, Lara, Murilo (Sorriso), Cabrito, Fruta, Lady, Gó, Francesco, Luis Augusto, Graveto, João (Tia), Doug, Enxada, Paloma, Maresia, Ratinho, Canto, Minivaca, Panda, Ju Avila, Toco, Giovanna, Muguerço, Ariane Cortes, todos os ritimistas da Bateria Porcaria e à Geologia de Rio Claro que sempre estiveram comigo tanto nos momentos felizes quanto nos difíceis, sempre me trazendo amparo e felicidade.

E á todos que de alguma forma contribuíram para encorajar minha caminhada.

Resumo

As estruturas dômicas permianas da Bacia do Paraná já foram relativamente estudadas por diferentes autores ao longo dos anos. Bastante peculiares, essas feições têm gerado interpretações diversas quanto às suas origens. Os domos de Anhembi foram, em 2005, estudados por Yamamoto e colaboradores, os quais os associaram a um processo de exsudação hidrotermal do tipo “geiser”. Sua publicação consagrou esses domos nos denominados Geiseritos de Anhembi, os quais vieram a ser patrimônio geológico local. Este trabalho consiste em um estudo de detalhe sendo respaldado por uma grande quantidade de dados de campo, referências bibliográficas atuais, análise petrográfica e métodos modernos, como seções MEV e espectrometria Raman. Evidências como presença de sílica globular, alta porosidade e silicificação intensa corroboraram um possível novo modelo com base em um caso do Mar do Japão, os denominados *hydrocarbon seeps*, estruturas de escape de gases, especialmente metano. A análise procedeu para a identificação de hidrocarbonetos pelo método Raman que validassem essa hipótese. Dessa forma, foram encontrados metano e etano na estrutura cristalina da sílica, fornecendo respaldo para inserção dos domos nesse novo modelo alternativo.

Palavras-chave: estruturas dômicas; Formação Teresina; hidrocarbonetos.

Sumário

1. Introdução	6
2. Objetivos.....	8
3. Localização e acessos	8
4. Materiais e métodos.....	9
5. Contexto geológico da área de estudo	12
I. Geologia Regional.....	12
II. Estruturas dômicas nas sucessões Paleozoicas da Bacia do Paraná: revisão e problemática	16
6. Resultados e discussão.....	18
7. Origem dos domos de Anhembi	31
8. Conclusões.....	32
9. Referências Bibliográficas	32

Índice de figuras

Figura 1: Detalhe de alguns domos observados em campo. Notar a presença de orifício central (A e B) e paredes coalescidas (C).	6
Figura 2: Detalhe de domos de tamanho diminuto desenvolvidos em camadas carbonáticas.....	7
Figura 3: Associação de um ou mais domos silicificados, por vezes apresentando paredes coalescidas	8
Figura 4: Localização da área de estudo (assinalada em vermelho) com o trajeto realizado do ponto 001 ao ponto 002. Composição sobre imagem de satélite adquirida no software livre Google Earth® (acessado em 06/09/2016).....	9
Figura 5: Esquema ilustrando os elementos geométricos dos domos mensurados em campo medidas sendo h a altura do domo, ExM o eixo de maior comprimento, Exm o eixo de menor comprimento. Em casos de domo com abertura apical, dmaior corresponde ao maior eixo de abertura e dmenor ao menor eixo de abertura, Lmaior corresponde à maior espessura da parede do domo e Lmenor à menor espessura da parede do domo. ..	11
Figura 8: Foto para Sul mostrando o alinhamento N-S dos domos. Notar as duas fileiras paralelas.	20
Figura 9: Diagrama em roseta das direções de alinhamento medidas em campo, totalizando 33 medidas. Notar o vetor principal N-S.....	21
Figura 11: Fotos da lâmina ANH-4 destacando o bandamento textural. Escala em A e B = 1mm, objetiva de 5X; em A nicóis paralelos, em B nicóis cruzados.....	24
Figura 12: Detalhe da lâmina ANH-4 mostrando geodo preenchido por calcedônia, circundado por quartzo botroidal. Escala em A e B = 0,5mm, objetiva de 5X; em (A) nicóis paralelos; em (B) nicóis cruzados.....	24
Figura 13: Detalhe da lâmina ANH-4 destacando brechas permeadas por quartzo microcristalino. Escala em A e B = 0,5 mm, objetiva de 5X. Em (A) nicóis paralelos; em (B) nicóis cruzados.....	25
Figura 14: Em A e B, um corte de carapaça de ostracode centralizado na foto, notar a protuberância da articulação de sua valva. Em C e D, dois microfilamentos (avermelhado) silicificados entrecortados por veio de quartzo em pente. Escala em A, B, C e D = 0,25 mm, objetiva de 10X. Em A e C, nicóis paralelos; em B e D, nicóis cruzados.	25
Figura 16: Imagens de microscopia eletrônica da amostra ANH-4 registrando a presença de zircão (A, B) e titanita (B) arredondados. Em (C) e (D), destaca-se a predominância da sílica globular. Em E, o espectro EDS identificou a ocorrência de titanita e, em F, de zircão. Em A e B, escala = 200 micra; em C e D, escala = 100 micras.....	27
Figura 17: Imagens de MEV da amostra ANH-5 destacando a presença de barita intersticial entre grãos silicificados (A) e a presença de nódulos esmectíticos (B), ambos indicados em laranja. Em C e D, destacam-se os fragmentos angulosos envelopados parcialmente pela sílica. Escala em A = 100 micra; em B = 200 micra; em C = 100 micra; em D = 20 micra.....	28

1. Introdução

As estruturas dômicas de Anhembi, SP, constituem uma ocorrência rara no registro geológico e única na Bacia do Paraná (YAMAMOTO *et al.* 2005). Aproximadamente 4.500 estruturas cônicas silicosas ocorrem aparentemente de forma aleatória, distribuídas em uma área de cerca de 1.5 km², perfazendo parte da porção superior da Formação Teresina de idade permiana (YAMAMOTO *et al.* 2005). Do ponto de vista morfológico, essas elevações cônicas se assemelham a cupinzeiros (ocasionalmente com depressões e orifícios no centro), tanto pelas dimensões quanto pela geometria, podendo atingir alturas máximas de até 1,7 m. De forma geral, os domos ocorrem como aglomerados coalescidos entre duas ou mais elevações, ou individualmente, isolados na paisagem (Fig. 1). As paredes e núcleos são essencialmente constituídos por quartzo micro-cristalino, *chert*, com vesículas que podem estar preenchidas (parcialmente ou por completo) por calcedônia ou cristais milimétricos a centimétricos de quartzo.

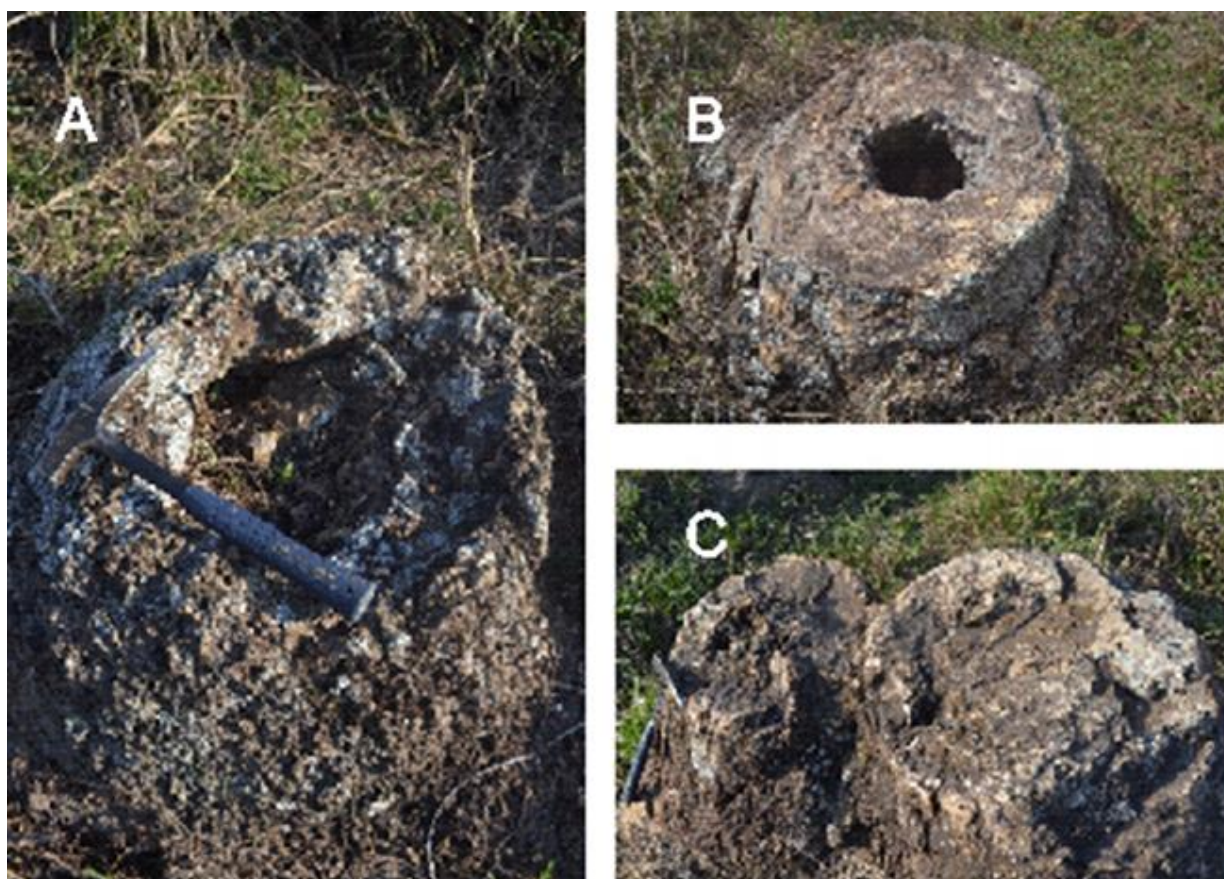


Figura 1: Detalhe de alguns domos observados em campo. Notar a presença de orifício central (A e B) e paredes coalescidas (C).



Figura 3: Associação de um ou mais domos silicificados, por vezes apresentando paredes coalescidas

2. Objetivos

O uso da denominação “geiserito” para os domos silicificados em questão necessariamente sugere que estas estruturas são geradas por processos hidrotermais, o que não é consensual na literatura. Face à ausência de um modelo genético adequado para os domos de Anhembi, esse trabalho objetiva a análise sistemática destas estruturas quanto a composição elementar e mineralógica, aspectos petrográficos e ultraestruturais, morfologia macroscópica e posição estratigráfica. Espera-se que a aplicação de diferentes métodos gere uma gama de resultados quantitativos e qualitativos que auxiliem no entendimento da gênese das estruturas dômicas em questão.

3. Localização e acessos

A área de estudo está situada no município de Anhembi, município localizado na porção central do Estado de São Paulo (Fig. 4 e 6). A localidade em que ocorrem os domos perfaz o topo de colinas recobertas por pastagem e é conectada à área urbana de Anhembi por meio de estradas de terra com boa condição de trafegabilidade. A área em que ocorrem os domos perfaz uma área aproximada de 1.5 km² localizada entre as coordenadas de longitude 22K 789055 E e 22K 748073 E e de latitude 7480563 S e 7476413 S, datum WSG84.

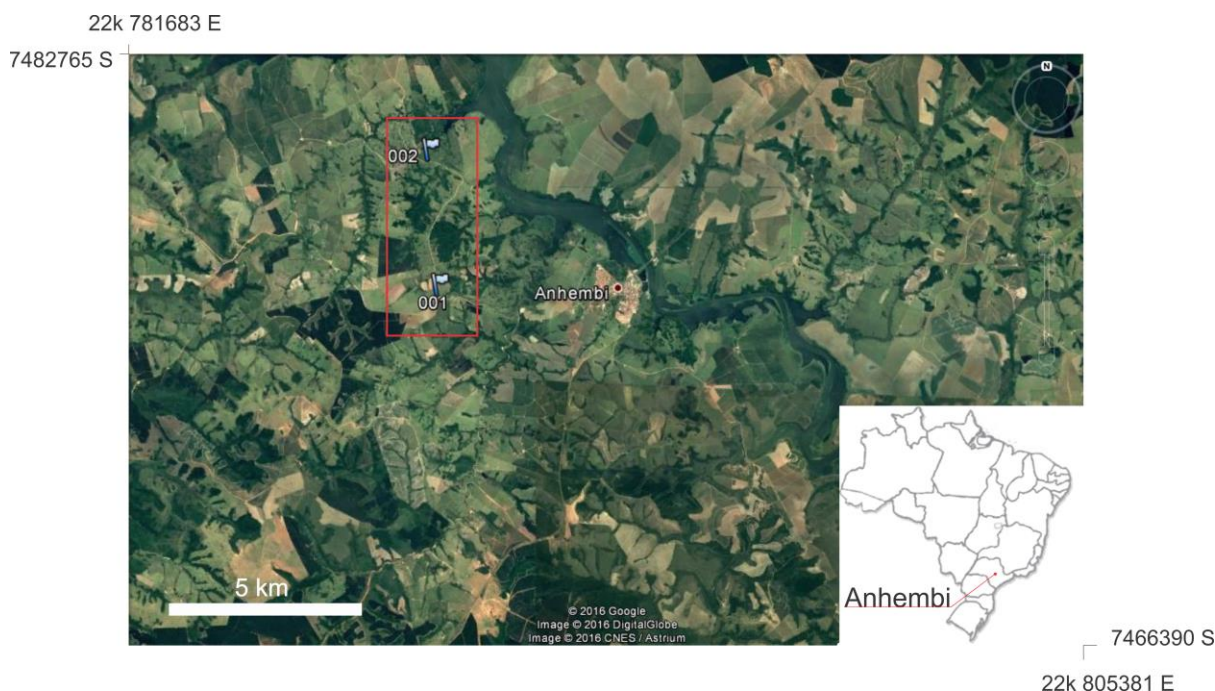
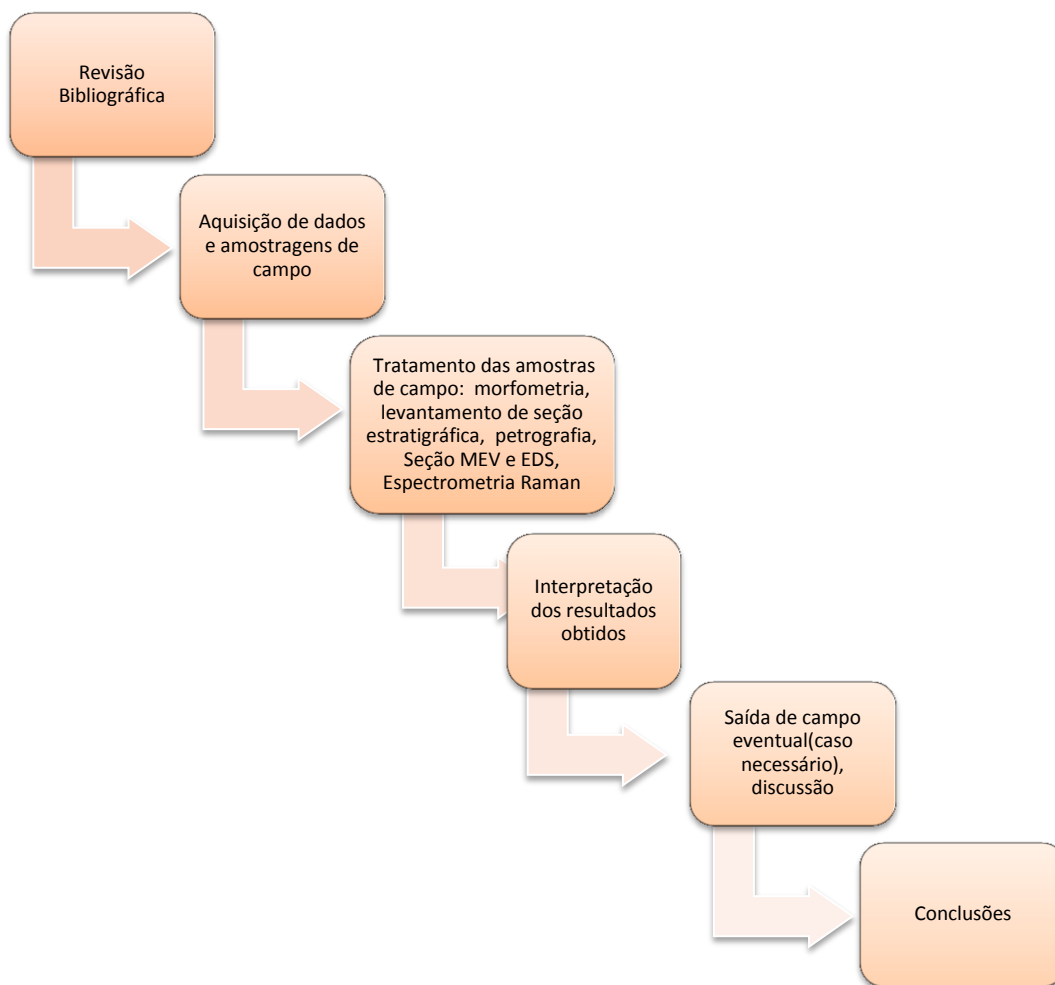


Figura 4: Localização da área de estudo (assinalada em vermelho) com o trajeto realizado do ponto 001 ao ponto 002. Composição sobre imagem de satélite adquirida no software livre Google Earth® (acessado em 06/09/2016).

4. Materiais e métodos

Inicialmente, propôs-se a leitura crítica de bibliografia referente a estruturas dômicas presentes no Permiano da Bacia do Paraná. Em paralelo, foi realizada a leitura de artigos científicos sobre a estratigrafia da bacia, aspectos sedimentares da unidade detentora da ocorrência e aspectos sedimentológicos e geoquímicos. Neste sentido, especial atenção foi dada a literatura concernente a descrição e interpretação de estruturas de origem hidrotermal, processo de exsudação de metano, *vents* submarinos e vulcões de lama.

A distância reduzida (~100 km) entre os municípios de Rio Claro (sede da unidade em que se desenvolveu o presente projeto) e Anhembi (área de estudo), conferiu uma boa vantagem logística para as atividades de campo e coleta. Foi realizada uma única saída de campo de dois dias, consistindo esta na descrição sistemática de parâmetros morfológicos, geométricos e composicionais dos domos, bem como nos padrões de arranjo destes (domos agrupados ou individuais, coalescentes ou não), levantamento estratigráfico regional e amostragem seletiva.



Fluxograma 1: Etapas de trabalho.

Durante a etapa de campo foram medidas 183 estruturas silicificadas contemplando as medidas de altura dos domos (**h**), eixo de maior elongação (**ExM**), eixo de menor elongação (**Em**), presença ou não de conduto (em caso positivo, medidas de diâmetro da abertura e espessura da parede), elementos direcionais (direção da maior elongação, alinhamento a domos adjacentes e presença/ausência de fraturamento) e presença ou ausência de coalescimento/junção entre dois domos ou mais (Fig. 5). As medidas foram posteriormente tratadas estatisticamente e representadas em gráficos do tipo histograma. Feitas as medidas, foi levantada a seção estratigráfica regional com o método de visadas utilizando uma bússola Brunton. A seção teve por finalidade localizar estratigraficamente o nível de incidência dos domos.

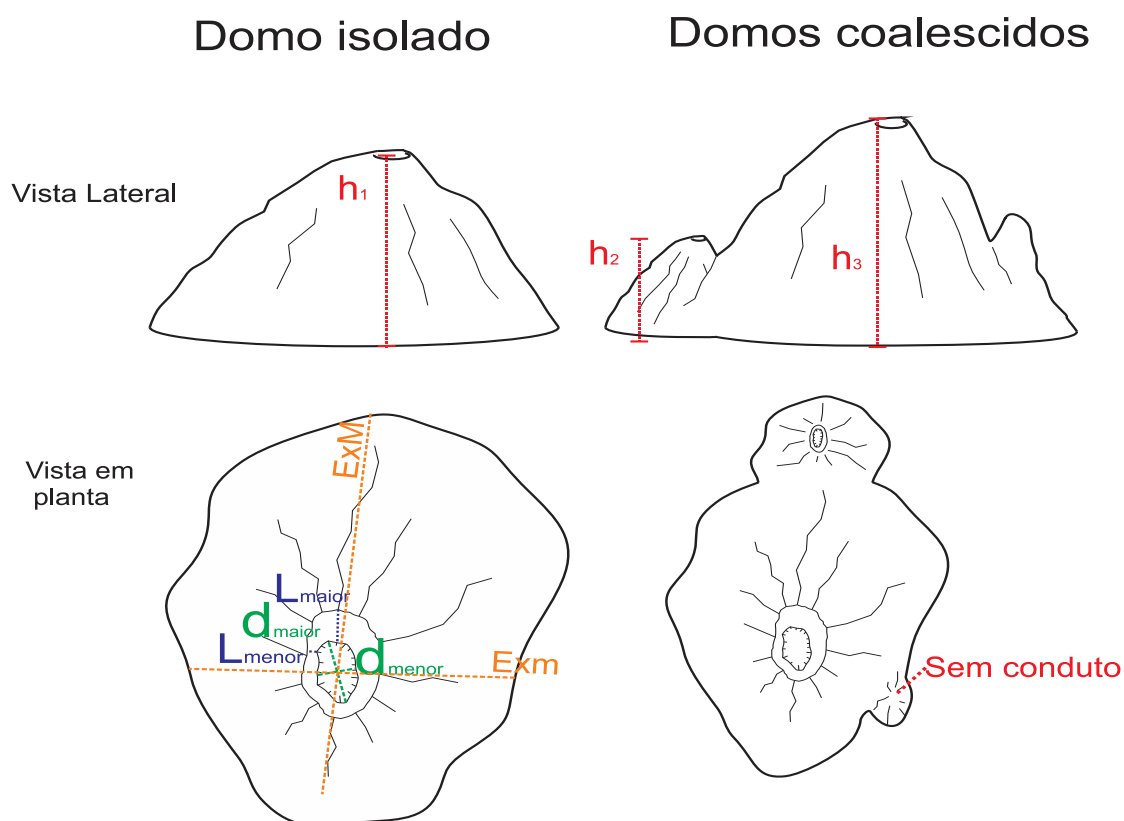


Figura 5: Esquema ilustrando os elementos geométricos dos domos mensurados em campo medidas sendo h a altura do domo, ExM o eixo de maior comprimento, Exm o eixo de menor comprimento. Em casos de domo com abertura apical, d_{maior} corresponde ao maior eixo de abertura e d_{menor} ao menor eixo de abertura, L_{maior} corresponde à maior espessura da parede do domo e L_{menor} à menor espessura da parede do domo.

A partir da coleta de amostras representativas em campo, foram realizadas as etapas de preparação e confecção de lâminas delgadas. Para as análises de microscopia óptica e de varredura eletrônica (MEV), foram selecionados materiais oriundos da parede de um domo preservado (amostra **ANH-4**) e da rocha carbonática circundante na base dos domos (amostra **ANH-5**).

O estudo petrográfico óptico das amostras consistiu na análise de composição mineralógica, do conteúdo fóssil, estrutura, hábito e trama dos minerais. As análises foram realizadas no Laboratório de Fotomicroscopia (Fotolab), pertencente ao Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), no qual foram utilizados:

- Microscópio óptico de luz transmitida da marca Zeiss Axiscope, com objetivas de 2,5, 5, 10, 20, 50 e 100 x (aumento de 25, 50, 100, 200, 500 e 1000x, respectivamente);
- Câmera Canon EOS 5D Mark II acoplada ao microscópio óptico.
- Computador equipado com software EOS Utility com Live View Shoot.

Posteriormente à análise petrográfica, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABESEM do Departamento de Petrologia e Metalogenia, do IGCE, UNESP, Rio Claro), onde foram preparadas para as seções de MEV. As amostras foram deixadas durante um dia em uma capela a vácuo para a expulsão de gases aprisionados nos poros e em seguida foram recobertas pela metalização por carbono. Durante as seções de imageamento deu-se especial atenção a análise detalhada das estruturas, hábito dos minerais e arranjo do arcabouço sedimentar, bem como a análise pontual semi-quantitativa composicional utilizando o leitor de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), fabricado pela EDAX. A operação do MEV e do EDS foi executada com a câmara de amostra em baixo vácuo (entre 1 e 10 torr).

Finalmente, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Vidros do departamento de Física, UNESP, Rio Claro, onde foram preparadas para a análise de espectrometria Raman. A espectrometria Raman é uma técnica fotônica de alta resolução que permite obter informação química e estrutural de diversos materiais (principalmente sólidos), compostos orgânicos ou inorgânicos permitindo assim sua identificação (estrutura cristalina, identificação e diferenciação de fases). A operação de análise foi executada no Espectrômetro Monovista CRS Raman, de S&I, munido de *laser* de 633 nm de He-Ne, acoplado a um microscópio Olympus.

5. Contexto geológico da área de estudo

I. Geologia Regional

Os domos silicificados que são objeto deste estudo ocorrem na porção superior da Formação Teresina, unidade litoestratigráfica contida na porção superior do Grupo Passa Dois, o qual é constituído pelas formações Irati, Serra Alta, Teresina e Corumbataí (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI et al., 2007).

A Formação Irati, Permiano Inferior, representa a parte basal do Grupo Passa Dois e é conhecida pelo seu conteúdo em rochas betuminosas e fósseis de mesossaurídeos (HOLZ et al., 2010). A unidade tem espessura média de 40 metros e é dividida nas sub-unidades Membro Taquaral e Membro Assistência (SCHNEIDER et al., 1974; HOLZ et al., 2010).

O Membro Taquaral é composto por siltitos e folhelhos cinza a negros e sua deposição está associada a um ambiente marinho raso (mar epicontinental) com conexão

restrita ao oceano aberto, porém com maior circulação de água se comparada ao Membro Assistência (HOLZ et al., 2010).

A sucessão sedimentar do Membro Assistência está associada a uma rampa carbonática com mergulho para sudoeste, com a porção proximal localizada a norte e a mais distal a sul, admitindo-se conexão com o Oceano Pantalassa apenas por esta região (HOLZ et al., 2010). A porção basal desta unidade, a nordeste da bacia, corresponde aos sedimentos proximais da rampa, depositada em condições evaporíticas em que a alternância de climas seco e úmido pode ser evidenciada por ritmitos de dolomita e folhelhos betuminosos (HOLZ et al., 2010). A porção superior, correspondente a região distal da rampa, a sul da bacia, é caracterizada por folhelhos ricos em matéria orgânica, ocasionalmente intercalados com tempestitos carbonáticos ricos em fragmentos de ossos de mesossauros (HOLZ et al., 2010).

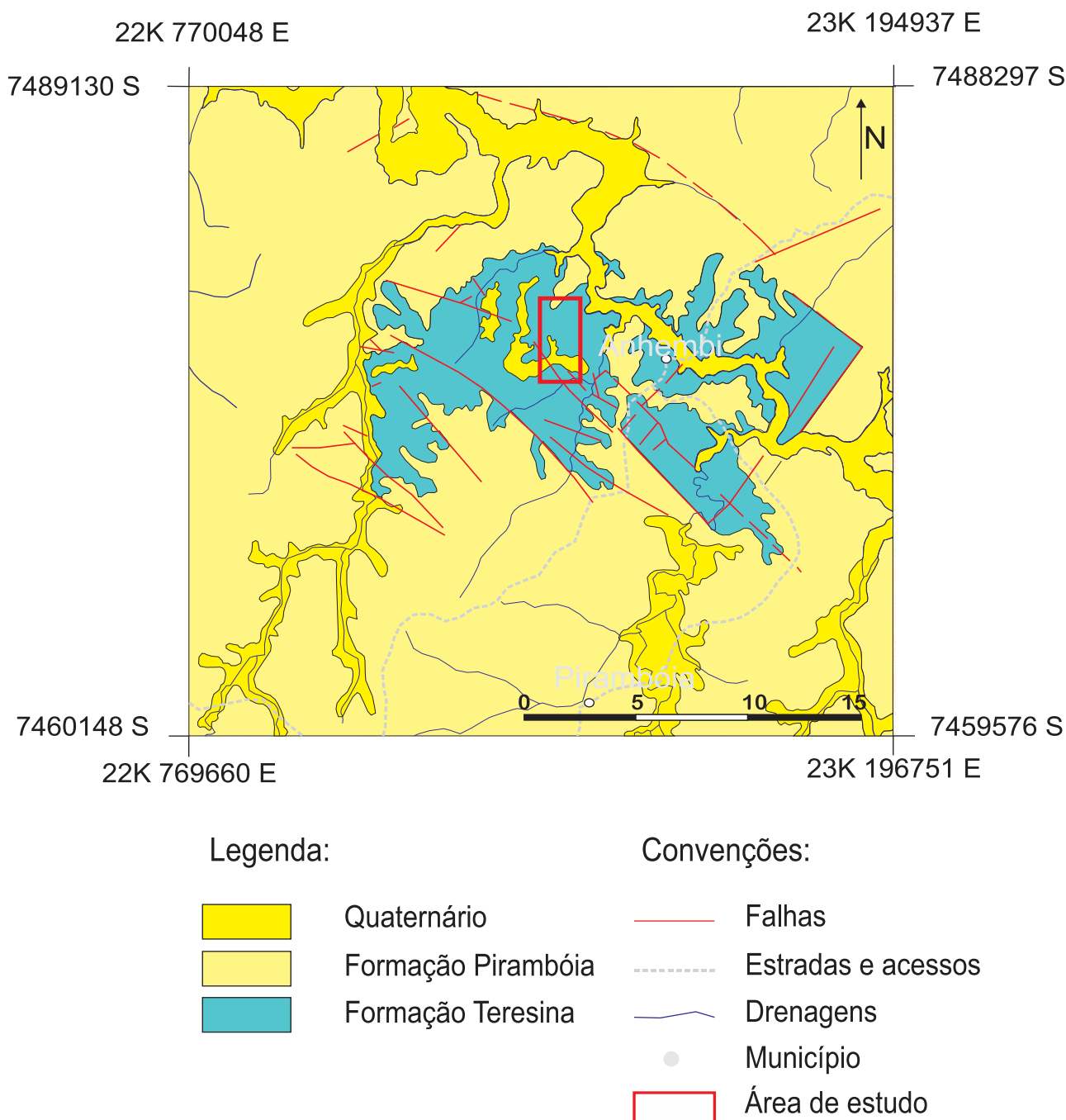


Figura 6: Mapa geológico da região de Anhembi destacando a área de estudo (base IPT 1981)

Depositada sobre uma desconformidade erosiva (diastema) presente no topo da Formação Irati (WARREN et al., 2015), a Formação Serra Alta, Meso-Permiano, é constituída por uma sequência de cerca de 50m de argilitos, folhelhos e siltitos cinza escuro a pretos, com lentes e concreções calcíferas intercaladas (SCHNEIDER et al., 1974; WARREN et al., 2015). O ambiente de deposição da unidade foi interpretado como

marinho de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas de tempestade (SCHNEIDER et al., 1974, WARREN et al., 2015), não havendo entretanto fósseis que comprovem origem marinha (HOLZ et al., 2010). Destacam-se na unidade a presença de peloides e de fósseis, como fragmentos fosfatizados de escamas, dentes e ossos de peixes paleoniscídeos, ictiodontes, coprólitos (WARREN et al., 2015) e bivalves como *Barbosaia angulata* e *Anhembia froesi* (GHILARDI & SIMÕES, 2002; WARREN et al., 2015).

A sucessão da Formação Teresina, Permiano Inferior a Meso-Permiano, unidade onde ocorrem os domos silicificados (YAMAMOTO et al. 2005) apresenta espessuras máximas aproximadas de 300m na porção leste da bacia, diminuindo progressivamente para nordeste da Bacia do Paraná (ROHN; FAIRCHILD, 2016). Esta particularidade sugere um progressivo raseamento para leste, com predomínio de ambiente costeiro de águas rasas e agitadas ocasionalmente sujeito a exposição subaérea (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI et al., 2007; ROHN; FAIRCHILD, 2016). Do ponto de vista litológico, a Formação Teresina constituída por pelitos cinzas intercalados com arenitos muito finos, com acamamento *flaser* (SCHNEIDER et al., 1974; ROHN; FAIRCHILD, 2016), *wavy*, ou *linsen*, geralmente bioturbados, podendo as camadas de arenitos mais espessas apresentar laminação cruzada por ondas ou estratificação cruzada *hummocky* (ROHN; FAIRCHILD, 2016). Entre as sucessões siliciclásticas, ou irregularmente intercaladas a estas, incidem camadas de rochas carbonáticas milimétricas a métricas por vezes substituídas por sílica (ROHN; FAIRCHILD, 2016). Estas são compostas por *ooigrainstones* (SCHNEIDER et al., 1974; ROHN; FAIRCHILD, 2016), *mudstones*, eventuais brechas carbonáticas e mais raramente níveis estromatolíticos (ROHN; FAIRCHILD, 2016). Nestas camadas carbonáticas também é comum a presença de escamas e dentes de peixes, micrófilos de licófitas silicificados, moluscos bivalves com valvas inteiras ou fragmentadas com baixa diversidade e aparentemente endêmicos à bacia (ROHN; FAIRCHILD, 2016). Ostrácodes são comuns em micritos e como núcleos de oóides (ROHN; FAIRCHILD, 2016).

.Os domos afloram na Formação Teresina (YAMAMOTO et al. 2005), ocorrendo em associação aos *Grainstones* da porção superior da unidade (Fig.7).

A Formação Corumbataí compreende sedimentos entre as Formações Irati e Pirambóia nos estados São Paulo, Goiás e Mato Grosso, tendo esse nome designado por Pacheco (1927) que indicou exposições representativas no vale do Rio Corumbataí, município de Piracicaba (SCHNEIDER et al., 1974). As Formações Serra Alta e Teresina são correspondentes lito-estratigráficas das porções inferior e superior dessa unidade,

respectivamente (WARREN et al., 2015). A Formação Corumbataí consiste em argilitos, folhelhos e siltitos de cores cinza escura na porção inferior e argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados com intercalações de bancos carbonáticos e camadas de arenitos muito finos na porção superior (SCHNEIDER et al., 1974).

Sucedendo em contato discordante à Formação Teresina ou à sua correspondente lito-estratigráfica Formação Corumbataí, a Formação Pirambóia é caracterizada por uma sucessão de arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados, médios e muito finos, silto-argilosos, grãos polidos, subangulares e subarredondados, com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos (SCHNEIDER et al., 1974). A unidade, com espessuras máximas de 270m em Anhembi e São Pedro (SP), apresenta estratificação cruzada, planar e acanalada, e laminação plano-paralela nas porções silto-argilosas (SCHNEIDER et al., 1974). A Formação Pirambóia documenta deposição fluvial e eólica, compondo uma unidade acunhada que se adelgaça para sudoeste no sentido da porção paranaense da Bacia do Paraná.(MILANI et al., 2007).

II. Estruturas dômicas nas sucessões Paleozoicas da Bacia do Paraná: revisão e problemática

A presença de estruturas dômicas nas unidades paleozoicas do Grupo Passa Dois sempre suscitou dúvidas quanto à sua origem. Domos silicificados (ou não) com morfologias diversas nas formações Irati, Corumbataí e Teresina foram tentativamente interpretados como de origem microbial, evaporítica (diápiros de sal), entomológica (cupinzeiro), hidrotermal (gêiseres) ou depósitos exalativos (SOARES, 1972; YAMAMOTO, 2005; CALÇA; FAIRCHILD, 2012; TINIVELLA; GIUSTINIANI, 2012).

Os domos de Anhembi foram tradicionalmente descritos como estruturas cônicas ou dômicas, isoladas ou agrupadas em até quatro cones, que podem chegar a 2 metros de altura apical (YAMAMOTO et al. 2005). Em alguns casos, devido à erosão, suas paredes não estão preservadas, conferindo a impressão de corte transversal ou anelar em planta e, tridimensionalmente, de tronco de cone. As paredes dos domos preservados são geralmente íngremes, desenhando silhueta angulosa, e apresentam entre 10 a 50cm de espessura, sendo o núcleo desses domos repleto de cavidades, preenchidas ou não. Os cones com parede mais espessa são predominantes e apresentam seus respectivos núcleos preservados (YAMAMOTO et al. 2005). Em um dos cones, foi identificada a presença

fósseis carbonáticos silicificados como bivalves, intraclastos, oóides e oncóides nodulares (YAMAMOTO et al. 2005).

Essas pilhas podem ter correspondência microbiana, visto que são morfológicamente semelhantes a construções estromatolíticas, a exemplo da ocorrência do famoso campo dos estromatólitos gigantes em Santa Rosa do Viterbo (SOARES, 1972). Inicialmente, postulou-se que essas estruturas eram de origem biológica (SOARES, 1972), mais especificamente, relacionada a construção de estruturas estromatolíticas por cianobactérias, no entanto, a ausência de feições diagnósticas (eg. laminação microbial, células preservadas) permitiu refutar essa hipótese (YAMAMOTO et al. 2005).

Trabalhos mais recentes também associam estruturas cônicas a vulcões de lama (“*mud volcanos*”) ou *vents* de exalação de metano (TINIVELLA; GIUSTINIANI, 2012).

Morfológicamente, esses domos se assemelham a cupinzeiros silicificados ou a domos de sal. No entanto, ambas origens são consideradas improváveis, já que, no interior desses domos é comum a presença de sedimentos da Formação Teresina, sugerindo origem eo-diagenética. A origem precoce destas estruturas também é atestada pela presença de estruturas de compactação do sedimento ao redor do domo, como que este se comportasse como um objeto rígido durante a compactação do sedimento (YAMAMOTO et al. 2005).

A forma cônica dos domos e a semelhança a pequenas fumarolas também remetem a uma possível origem exalativa do tipo *White* ou *Black smokers*, entretanto, dado ao contexto intracratônico da Bacia do Paraná, essa hipótese parece pouco provável uma vez que esses tipos de depósito são característicos de limites de margens divergentes. Além disso, a análise geoquímica da sílica dessas “chaminés” não encontrou minerais diagnósticos de depósitos exalativos, tais como sulfetos de Cu-Fe, anidrita ou barita, tal qual seu produto mais comum de alteração, a limonita (YAMAMOTO et al. 2005). A composição primária de sílica microcristalina e o fato das rochas terrígenas da Formação Teresina sempre truncarem as superfícies externas dos domos, indicaria, portanto, uma gênese diretamente relacionada a exudações hidrotermais do tipo gêiseres (YAMAMOTO et al. 2005). Contudo, para isso é necessário que haja uma fonte térmica e a única evidencia desta seria a presença de raros níveis de cinzas vulcânicas nas Formações Irati e Rio Bonito.

Apesar da hipótese de origem por exsudação hidrotermal do tipo gêiseres ser atualmente a mais aceita, trabalhos recentes tem associado a origem de estruturas

dômicas semelhantes ao mecanismo de exsudação de hidrocarbonetos e formação de *vents* (*hydrocarbon seeps* ou *cold seeps*) (MIYAJIMA et al., 2016).

Hydrocarbon seeps ocorrem nas margens continentais ativas e passivas do mundo, como no nordeste, noroeste e sudeste do oceano Pacífico, Golfo do México, Mar Mediterrâneo, Mar Negro, leste do oceano Atlântico, Nova Zelândia e no Mar do Japão (MIYAJIMA et al., 2016). Essas estruturas, a exemplo do Mar do Japão, são formadas pela emanção de bolhas de gás (plumas metanogênicas), decorrente da acumulação de sedimentos ricos em matéria orgânica combinada com fluxo de alta temperatura (MIYAJIMA et al., 2016). Os planos de descontinuidade, como falhas e descontinuidades geológicas, atuam de maneira fundamental como caminhos de migração para o escape dos gases e bactérias anaeróbicas seriam então responsáveis pelo metabolismo desta matéria orgânica, segundo a equação a seguir:



(MIYAJIMA et al., 2016)

A oxidação anaeróbica do metano causa então o aumento brusco na alcalinidade, implicando na precipitação de carbonatos, na forma de calcita, aragonita e dolomita (MIYAJIMA et al., 2016). Com o decorrer dos processos diagenéticos o agregado carbonático pode ser substituído por alteração de minerais silicosos, podendo então ocorrer a cimentação de cavidades por sílica e silicificação de carapaças e de tubos escavados por organismos (MIYAJIMA et al., 2016).

6. Resultados e discussão

I. Morfometria e nível de incidência das estruturas dômicas de Anhembi.

Do ponto de vista geomorfológico, os cones silicosos rígidos ocorrem em porções mais elevadas do relevo, conferindo maior resistência deste à erosão. A interface entre o material geológico mais resistente (domos) e o menos resistente (carbonatos e pelitos da Fm. Teresina) é marcada por uma quebra positiva do relevo. Constatou-se em campo que essas estruturas ocorrem numa área de platô elevado, sendo raras nas porções declivosas

associadas a quebra do relevo. Os domos incidem na rocha carbonática da porção superior da Formação Teresina (Fig. 7).

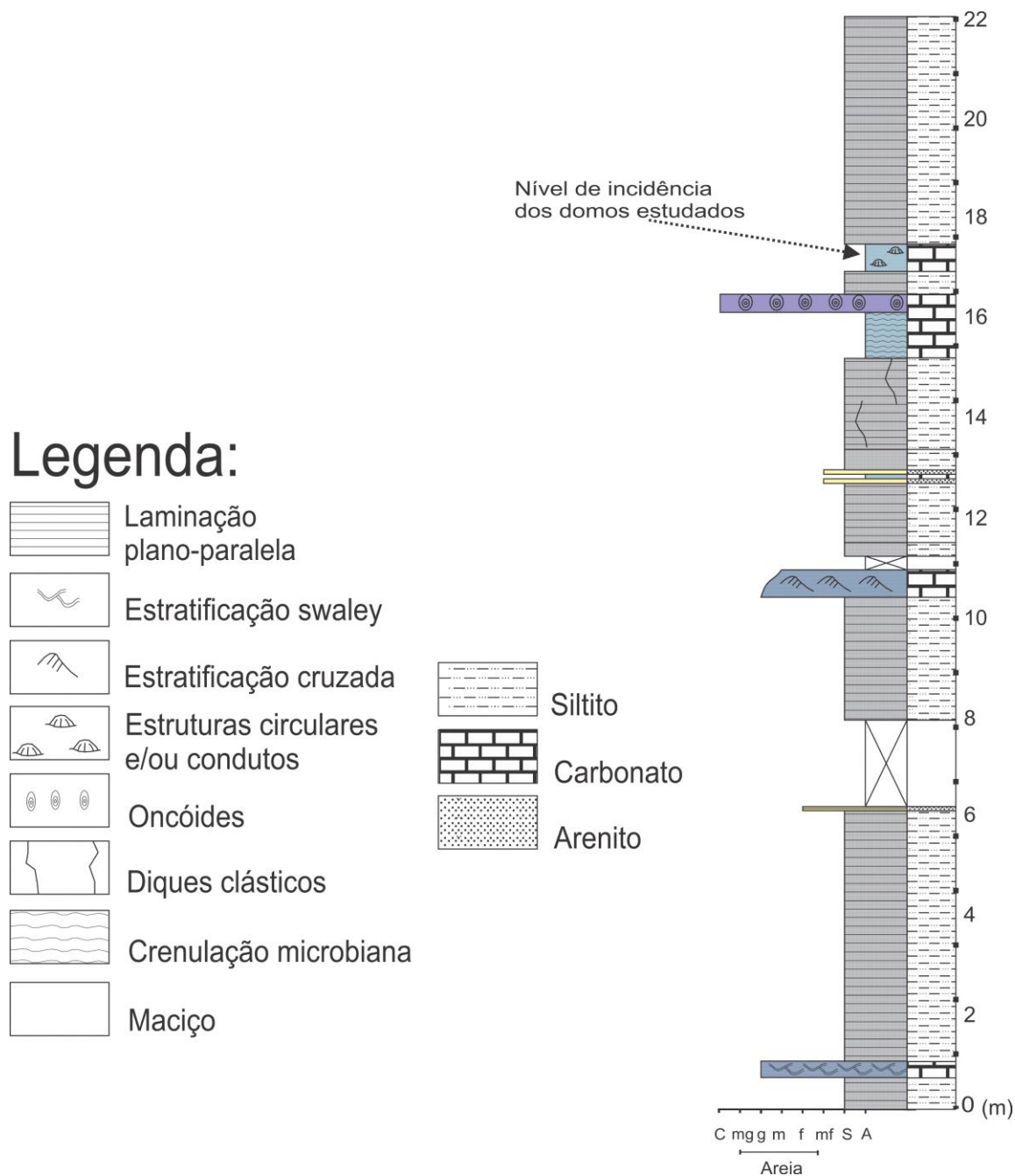


Figura 7: Seção colunar levantada em campo da Formação Teresina destacando o nível estratigráfico exato de ocorrência dos domos.

Ao observar a distribuição espacial dos domos, pode-se notar que estas claramente se encontram alinhadas nas direções N-S (secundariamente E-W), sugerindo um condicionante geológico estrutural (Fig. 8).

Com o tratamento dos dados direcionais de alinhamento no programa OpenStereo ©, elaborou-se o diagrama em roseta (Fig. 9) o qual evidenciou claramente o alinhamento preferencial para N-S e secundariamente nas direções E-W, NW-SE e NE-SW. Os alinhamentos NW e SE podem estar associados a lineamentos regionais de Tietê (NW) e Jacutinga (NE) (SOARES, 1974; CAVALLARO, 2013)



Figura 8: Foto para Sul mostrando o alinhamento N-S dos domos. Notar as duas fileiras paralelas.

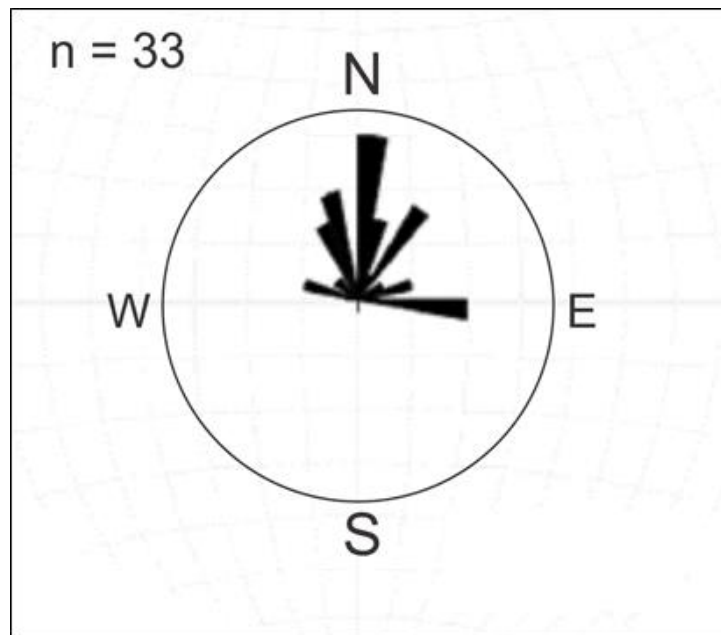


Figura 9: Diagrama em roseta das direções de alinhamento medidas em campo, totalizando 33 medidas. Notar o vetor principal N-S.

A arquitetura dos domos lembra pequenos cones de superfície irregular (Fig. 10), sendo a maioria não concêntrica e apresentando dois eixos de abertura (semelhante a uma elipse). O histograma da relação altura/eixo maior (h/EM) sugere um padrão geométrico de comprimento alongado e levemente achatado no eixo vertical, com proporções predominantes de 0,6 a 0,8 (Gráfico 1). Dos domos analisados, 32% apresentam conduto, com predomínio de diâmetros em torno de 20 a 30 cm de abertura. O fato da maioria dos domos não apresentarem abertura apical (Fig. 10) e serem mais achatados pode sugerir uma instabilidade no crescimento desses domos, como se houvesse um colapso a partir de um ponto crítico de altura.



Figura 10: Foto destacando o cilindro central oco dos domos.

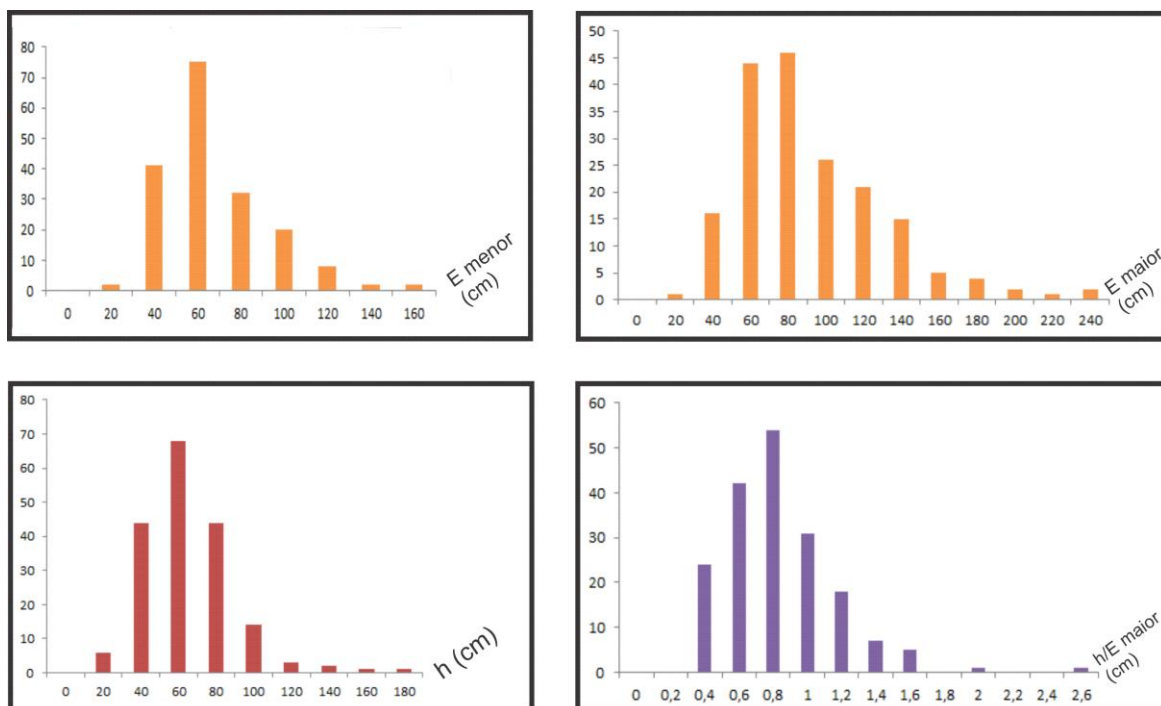


Gráfico 1: Histograma mostrando a tendência de variação de forma dos domos de Anhembi, sendo E menor (Exm) o eixo menor em planta, E maior (ExM) o eixo maior em planta, h à altura das estruturas e h/E maior à razão da altura pelo maior eixo.

II. Análise petrográfica e ultraestrutural

Do ponto de vista descritivo, as amostras (uma de domo e outra de rocha encaixante) podem ser organizadas segundo três compartimentos morfológicos: parede externa (domo), parede interna (domo) e rocha encaixante.

A parede externa dos domos é constituída essencialmente por sílica e contém frequentes poros por dissoluções parciais, os quais estão inseridos em uma trama microcristalina de sílica. Observa-se nesse compartimento a presença de bandamento textural entre cristais micrométricos (predominante) e cristais submilimétricos de sílica (Fig. 11), de até 0,2 mm de diâmetro, onde foram encontrados fósseis de ostrácodes e de micrófitas (Fig. 14).

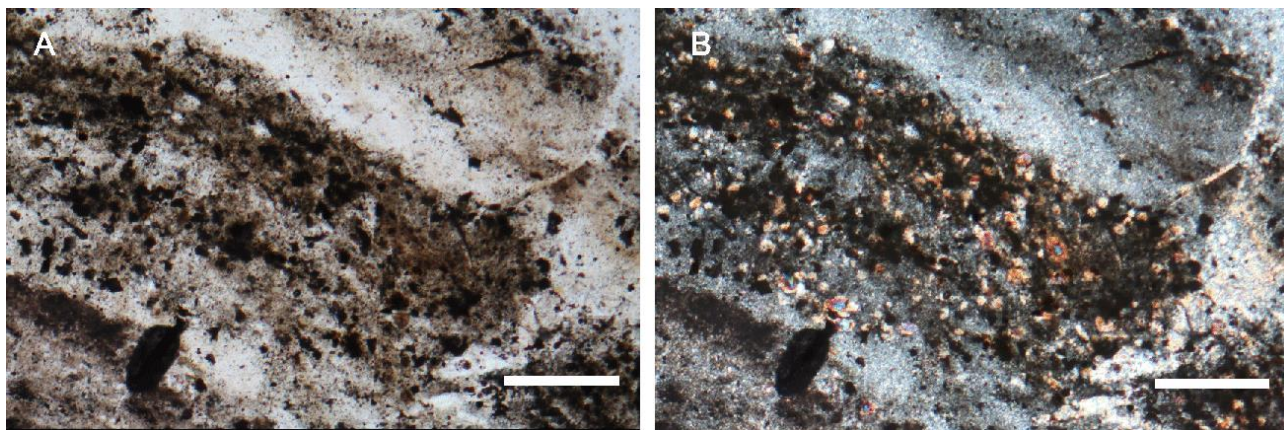


Figura 11: Fotos da lâmina ANH-4 destacando o bandamento textural. Escala em A e B = 1mm, objetiva de 5X; em A nicóis paralelos, em B nicóis cruzados.

No domínio da parede interna dos domos, nota-se a presença frequente de veios e geodos preenchidos por quartzo submilimétrico em pente ou calcedônia radial. Há concentrações de cavidades e poros secundários grandes proeminentes e grãos flutuantes (*floating grains*), nos quais comumente ocorrem cristais sacaroidais de quartzo, muito dos quais com hábito globular/botroidal (Fig. 12 e 15). Também é observado bandamento textural, porém com predominância de cristais submilimétricos de quartzo.

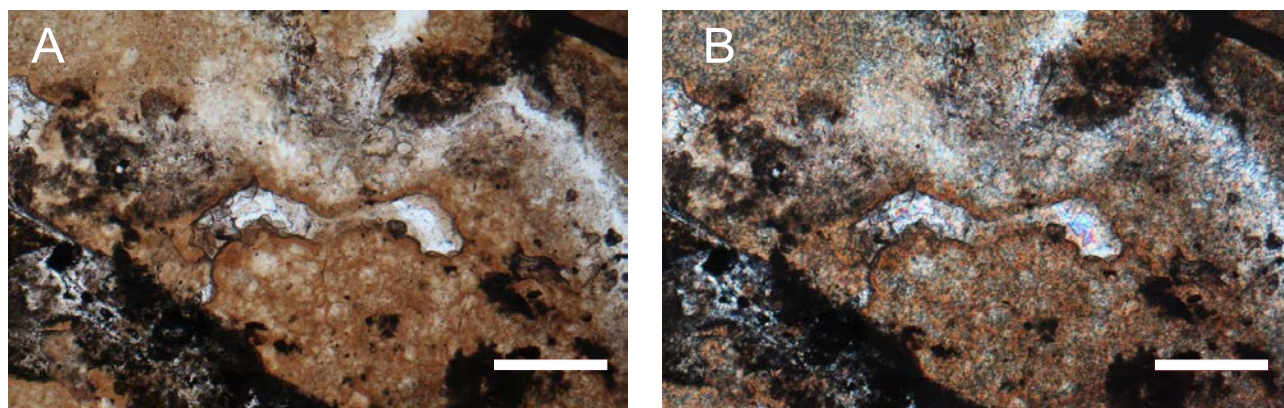


Figura 12: Detalhe da lâmina ANH-4 mostrando geodo preenchido por calcedônia, circundado por quartzo botroidal. Escala em A e B = 0,5mm, objetiva de 5X; em (A) nicóis paralelos; em (B) nicóis cruzados.

Localmente, também se observam porções brechadas (Fig. 13) cujo arcabouço é constituído por fragmentos de cristais de quartzo angulosos, de tamanho submilimétrico circundados por cimento de calcedônia radial e aspecto fibroso.

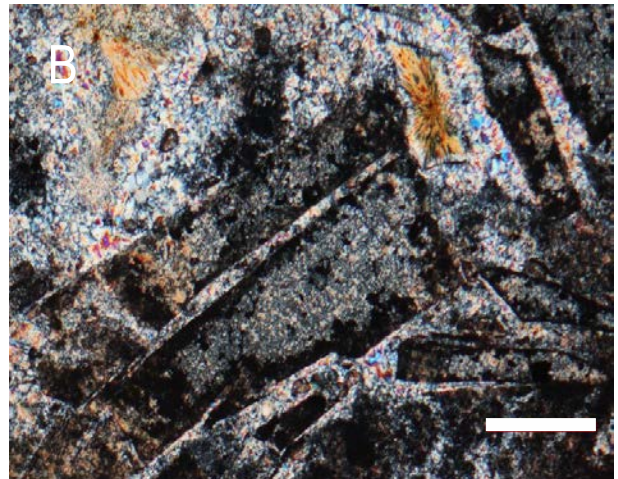
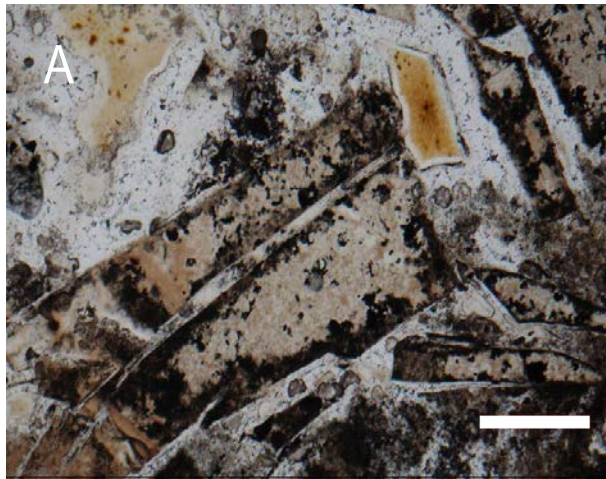


Figura 13: Detalhe da lâmina ANH-4 destacando brechas permeadas por quartzo microcristalino. Escala em A e B = 0,5 mm, objetiva de 5X. Em (A) nicóis paralelos; em (B) nicóis cruzados.

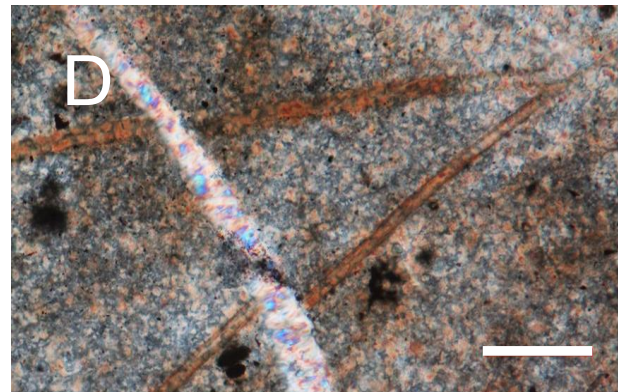
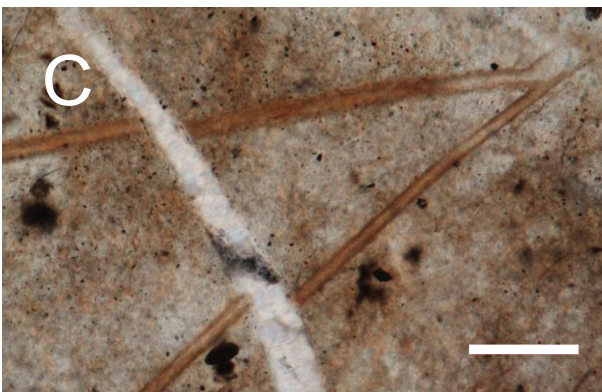
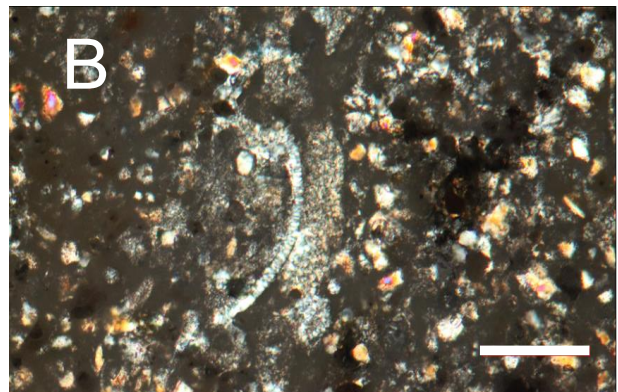
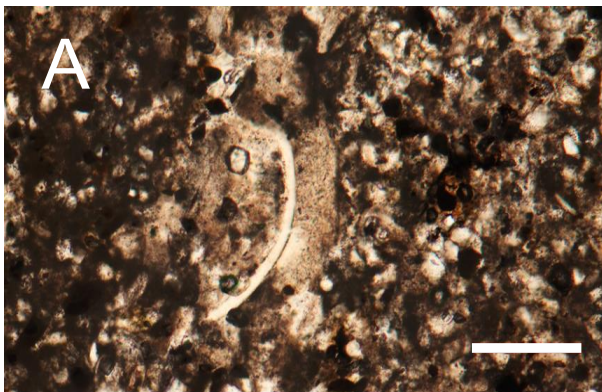


Figura 14: Em A e B, um corte de carapaça de ostracode centralizado na foto, notar a protuberância da articulação de sua valva. Em C e D, dois microfilamentos (avermelhado) silicificados entrecortados por veio de quartzo em pente. Escala em A, B, C e D = 0,25 mm, objetiva de 10X. Em A e C, nicóis paralelos; em B e D, nicóis cruzados.

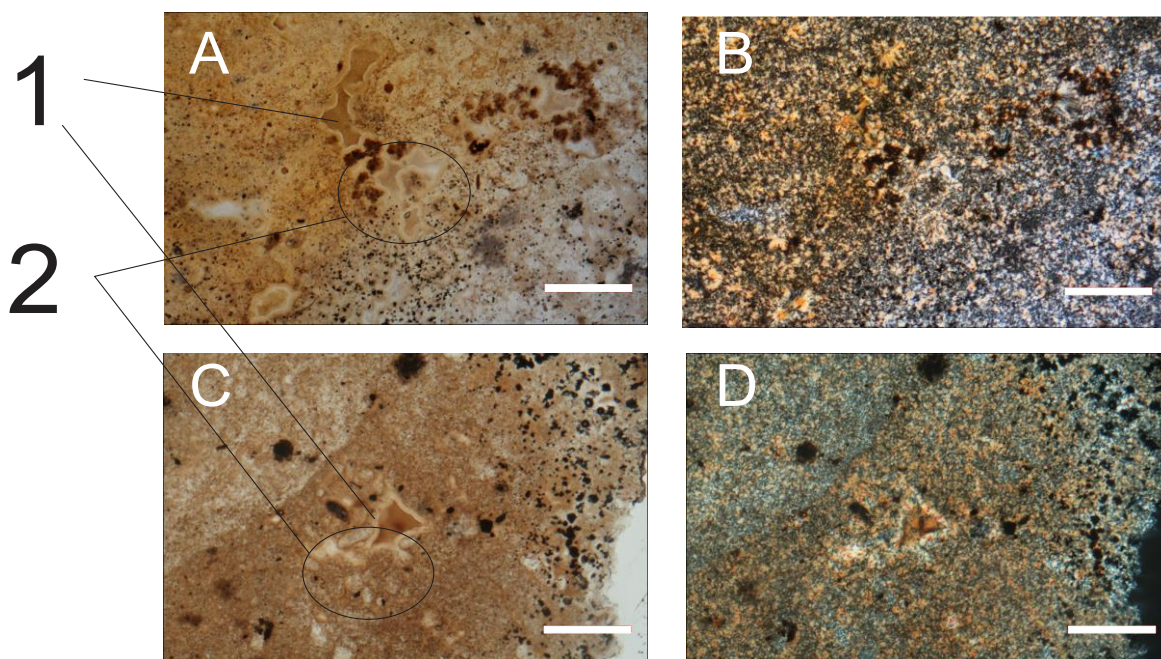


Figura 15: Foto da lâmina ANH-4 destacando poros abertos submilimétricos (1) e a ocorrência de quartzo sacaroidal (2). Escala em A, B, C e D = 0,5 mm, objetiva de 5X. Em A e C, nicóis paralelos; em B e D, nicóis cruzados.

A análise de MEV da fração microcristalina do chert da parede do domo, revelou o predomínio de sílica globular. Comumente, ocorrem cristais parcialmente dissolvidos e fragmentados envelopados por sílica, podendo ou não apresentar um zoneamento. Foram observados, dentre esses cristais envelopados, cristais de titanita e zircão arredondados (Fig. 16).

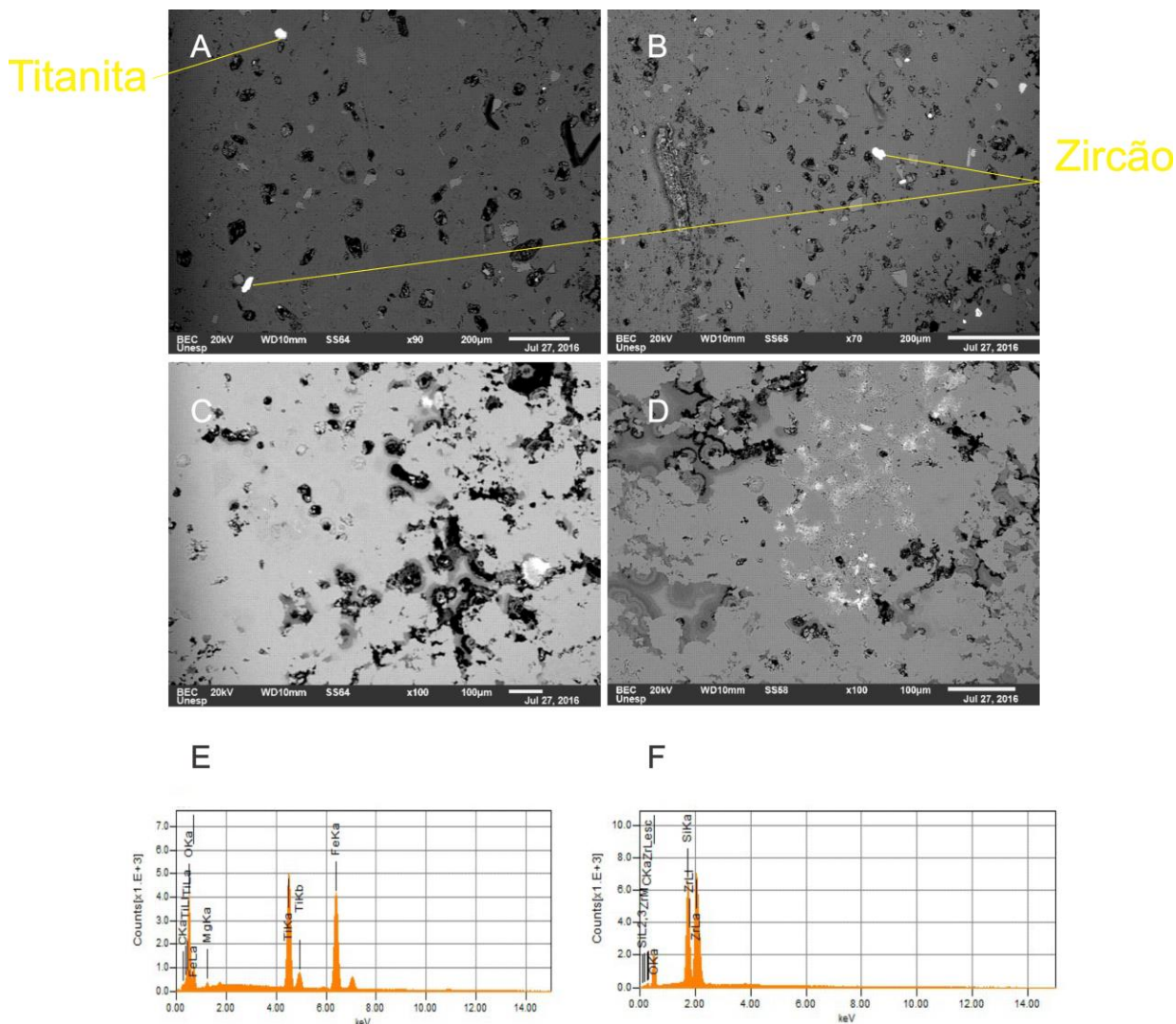


Figura 16: Imagens de microscopia eletrônica da amostra ANH-4 registrando a presença de zircão (A, B) e titanita (B) arredondados. Em (C) e (D), destaca-se a predominância da sílica globular. Em E, o espectro EDS identificou a ocorrência de titanita e, em F, de zircão. Em A e B, escala = 200 micra; em C e D, escala = 100 micras.

A rocha encaixante apresenta abundância de *peloides* distribuídos uniformemente pela lâmina. Os grãos de quartzo estão cominuídos em meio a uma matriz composta por carbonato (predominante), argilas esmectíticas e hidróxidos de ferro, como goethita. A matriz também apresenta também raras concreções de sílica. A rocha apresenta porosidade intergranular (primária) e por dissolução (secundária), sendo a primeira predominante. Segundo a classificação de Dunham (1962), predominam *grainstone* peloidais como as rochas encaixantes das estruturas dômicas.

As imagens de MEV e os dados de espectro EDS da amostra (Fig. 17) revelaram que o diâmetro dos cristais de quartzo menores varia entre de 2 a 5 micras. Localmente, observou-se a presença de barita intersticial em meio aos grânulos de quartzo. Nódulos de esmectita são frequentes e, por vezes, ocorrem silicificados. Há grande variação textural,

ocorrendo desde cristais individuais com diâmetro da ordem de 5 micras (predominantes) a núcleos recristalizados (Fig 17).

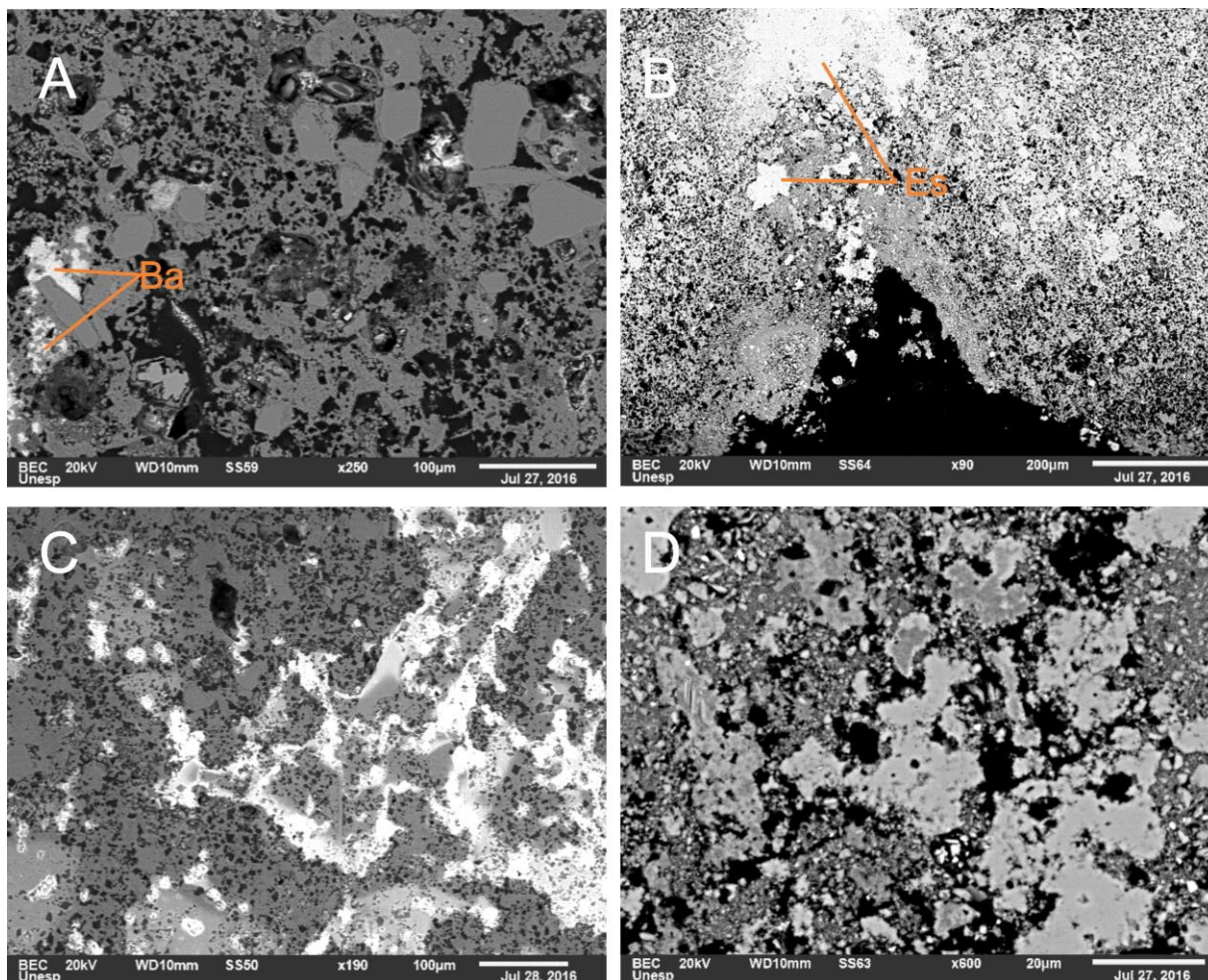


Figura 17: Imagens de MEV da amostra ANH-5 destacando a presença de barita intersticial entre grãos silicificados (A) e a presença de nódulos esmetíticos (B), ambos indicados em laranja. Em C e D, destacam-se os fragmentos angulosos envelopados parcialmente pela sílica. Escala em A = 100 micra; em B = 200 micra; em C = 100 micra; em D = 20 micra.

III. Espectroscopia RAMAN

A espectroscopia RAMAN é um método que consiste na interação de uma luz monocromática (laser) com um material, cuja natureza química, estrutura cristalina ou não, gera uma determinada reação óptica. Para cada material, parte da luz incidida sofre um espalhamento de acordo com suas particularidades micro-estruturais. Este espalhamento é discriminado pelo equipamento e é denominado Efeito Raman.

De acordo com o modelo dos *hydrocarbon seeps*, os hidrocarbonetos leves, metano e etano, seriam aprisionados nas estruturas da sílica globular, as quais teriam crescido encapsulando as bolhas de gases (MIYAJIMA et al., 2016). Com o método RAMAN, é possível identificar a presença dessas moléculas, se estas estiverem em quantidades expressivas na estrutura cristalina (Fig. 18).

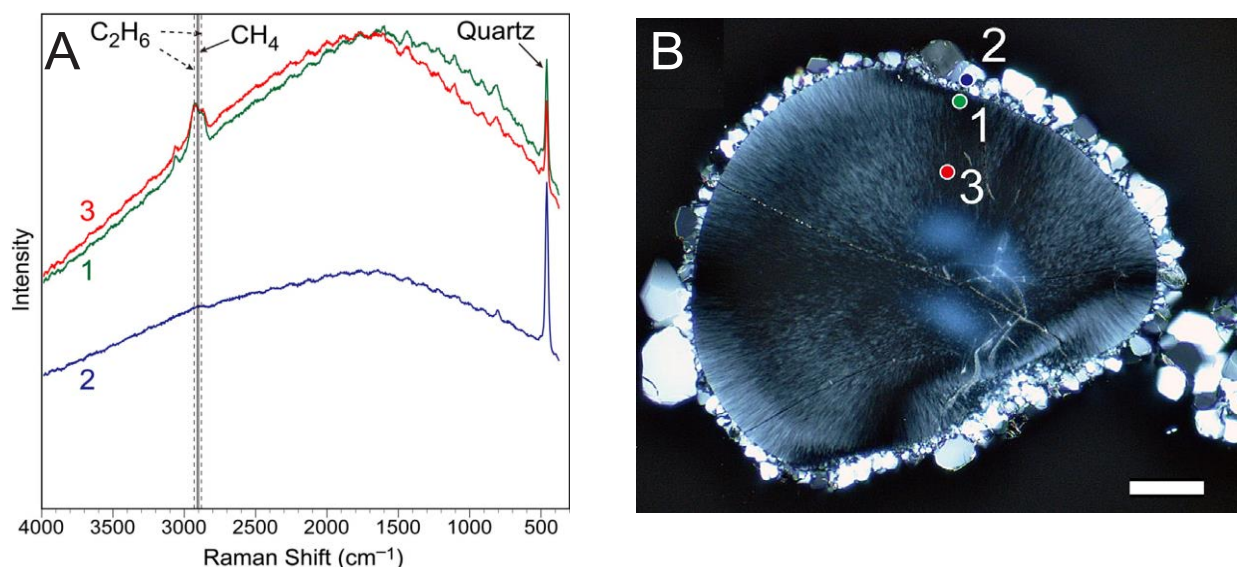


Figura 18: Em A, um diagrama com 3 espectros RAMAN revelando a presença de hidrocarbonetos, denotado pelos picos indicados. Em B, uma microfotografia com as regiões indicadas de onde foram feitas as espectroscopias (A) a partir de um “glóbulo” de sílica. Notar o cristal fibroso radial com cristais euédricos de quartzo ao seu redor. Escala em B = 100 μm . (MIYAJIMA et al., 2016)

A análise por espectroscopia RAMAN com a amostra de um dos domos de Anhembi almejou a análise da sílica globular principalmente presente na porção porosa das paredes das estruturas. Foram separadas três regiões com características semelhantes, ou seja, três distintos compartimentos: região interna ao poro (RIP), região de contorno ao poro (RCP) e região externa, proximal, do poro (REP). De acordo com o trabalho de referência, os picos do metano característicos são pares que podem ser 2905 e 2914 cm^{-1} , 2906 e 2917 cm^{-1} , 2901 e 2910 cm^{-1} , ou 2902.9 e 2910.7 cm^{-1} ; e do etano 2885.0 e 2938.8 cm^{-1} (MIYAJIMA et al., 2016), sendo portanto dada atenção a picos próximos a esses valores.

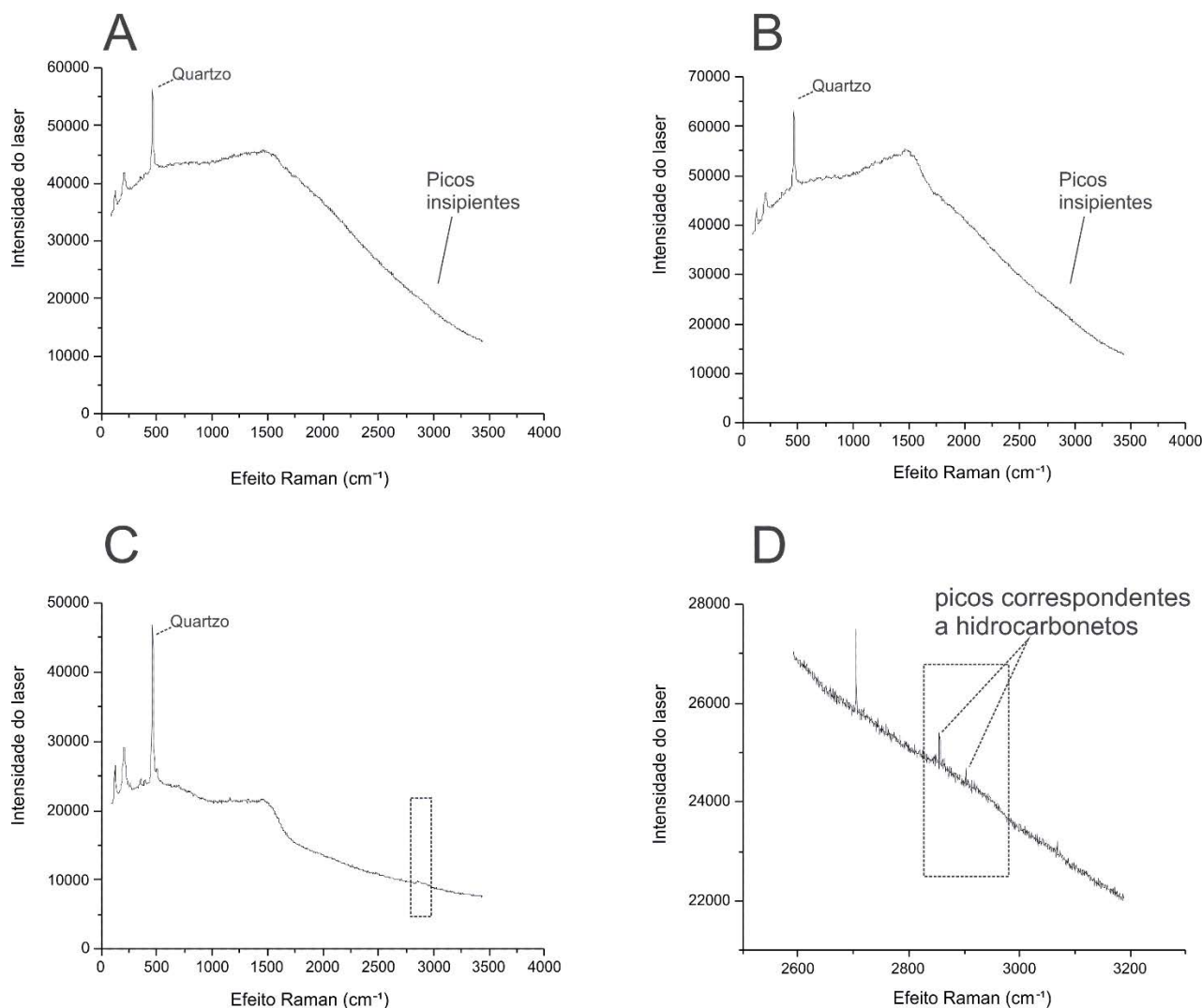


Gráfico 2: Em A, o gráfico do efeito Raman em uma RCP e, em B, em uma RIP. Notar a ausência de picos significativos entre valores de 2800 a 3000 cm^{-1} . Em C, o efeito Raman em uma REP apresentando picos brandos porém notáveis, indicados pela área pontilhada. Em D, foi feito um gráfico com maior resolução dos picos de interesse do gráfico C. Notar a presença dos picos em 2880 e 2910 cm^{-1} .

Os gráficos 2C e 2D revelam a presença de picos sutis porém notáveis em 2880 e 2910 nas regiões proximais aos poros, os quais correspondem a etano e a metano, respectivamente. Já os gráficos 2A e 2B não mostraram picos significativos, denotando a ausência desses gases nas regiões internas ou de borda dos poros. A ausência de picos correspondentes a hidrocarbonetos nas RCP e RIP pode estar relacionada ao escape dos gases devido à alta porosidade. Da mesma forma, a presença, pouco expressiva, desses gases nas REP pode estar relacionada a uma porosidade relativamente menor e, portanto, com maior potencial em aprisioná-los.

Para que os hidrocarbonetos sejam identificados pelo método Raman, é necessário que estes estejam em grande quantidade, ou seja, bem disseminados nas estruturas moleculares dos minerais (MIYAJIMA et al., 2016). As estruturas *hydrocarbon seeps* do Mar do Japão são mais recentes, Mioceno (MIYAJIMA et al., 2016), e portanto o efeito Raman para os picos de hidrocarbonetos tenderão a ser mais expressivos. No caso dos geiseritos de Anhembi, as estruturas têm idade Eo Permiana a Meso Permiana e portanto podem ter passado por processos que comprometeram a preservação da quantidade original desses gases. Portanto, o vestígio desses gases orgânicos devem ser levados em consideração de forma enérgica, já que corroboram um outro modelo de gênese, indo de encontro ao modelo pré-definido de exsudação hidrotermal do tipo *geiser*.

7. Origem dos domos de Anhembi

Muitos são os fatores que devem ser levados em consideração quando se trata de estabelecer um modelo para a gênese dos domos de Anhembi.

A ausência de crenulação microbiana ou de sinais de construção entomológica, afastou a hipótese desses domos serem de origem essencialmente biológica. O contexto intracratônico da Bacia do Paraná descartou a hipótese de origem exalativa do tipo *black smoker* ou *white smoker*, apesar da forma cônica, apresentando abertura apical ou não, remeter a uma associação exalativa.

O modelo baseado na exsudação térmica do tipo geiser pareceu atender a quase todos os parâmetros geológicos dessas estruturas. Entretanto, uma fonte térmica, aparentemente inexistente, se faz necessária para a validação completa desse modelo.

A sílica globular identificada na microscopia óptica e eletrônica permitiu voltar a atenção para o modelo do Mar do Japão, ou seja, levantando a hipótese desses domos consistirem em *hydrocarbon seeps*. A intensa silicificação e o maior tempo de exposição em comparação aos *seeps* japoneses, geiseritos de idade Permiana e *seeps* do Mar do Japão do Mioceno, tornaram as feições diagnósticas menos destacadas para enquadrar os domos nesse modelo. Contudo, o método Raman revelou a presença considerável de hidrocarbonetos aprisionados nas estruturas da sílica globular, atendendo assim aos parâmetros geológicos do modelo *hydrocarbon seeps*.

8. Conclusões

- i. Os domos de Anhembi são estruturas exalativas, eo-diagenéticas, intensamente silicificadas, dos quais aproximadamente 33% apresentam conduto ou abertura apical preservada. O fato do achatamento na base e da ausência de cilindro oco na maioria dos domos (67%) sugere uma instabilidade no crescimento dessas estruturas, como se a partir de uma altura crítica houvesse um colapso e um abatimento desses domos.
- ii. A petrografia óptica e eletrônica revelou a presença de quartzo sacaroidal, sílica globular, nódulos de sílica em forma de calcedônia e porosidade expressiva, indicando silicificação e associação genética exalativa.
- iii. Os domos apresentam elementos direcionais como alongação e alinhamento a domos adjacentes. A direção preferencial predominante de alinhamento adjacente dos domos foi N-S, seguida das direções E-W, NW-SE e NE-SW, sendo estas duas últimas associadas ao falhamento regional Tietê (NW) e Jacutinga (NE).
- iv. A análise do efeito Raman na amostra dos domos revelou afinidade ao modelo dos *cold seeps*, ou *hydrocarbon seeps*, pela identificação de hidrocarbonetos como metano e etano presentes na estrutura da sílica globular.

9. Referências Bibliográficas

CALÇA, C. P.; FAIRCHILD, T. R. Petrographic approach to the study of organic microfossils from the Irati Subgroup (Permian, Paraná Basin, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 35, p. 51–61, 2012.

CAVALLARO, F. D. A. Investigação Geofísica do Alto Estrutural de Anhembi - SP. Instituto de

Geociências, Universidade de São Paulo, 2013, 148p.

DUNHAM, R.J. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. **American Association of Petroleum Geologist Memoirs**, 1, 108-121, 1962.

GHILARDI, R. P.; SIMÕES, M. G. Foram os Bivalves do Grupo Passa Dois (Exclusive Formação Rio do Rasto), Neopermiano , Invertebrados Tipicamente Dulcícolas ? **Pesquisas em Geociências**, v. 29, n. 1, p. 3–13, 2002.

HOLZ, M. et al. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Parana Basin, Brazil, South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, n. 2, p. 381–399, 2010.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. n. January, p. 265–287, 2007.

MIYAJIMA, Y. et al. A late Miocene methane-seep deposit bearing methane-trapping silica minerals at Joetsu , central Japan. v. 455, p. 1–15, 2016.

NOMURA, S. F. Hidrotermalismo evidenciado por minerais autigênicos e inclusões fluidas da formação Teresina, Bacia do Paraná. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. 2012, 149p.

PACHECO J.A.. Relatório elucidativo do esboço geológico da região compreendida entre o meridiano 4 Rio Itararé e os paralelos 23 34 e 24 38. **Comissão Geográfica e Geológica**. São Paulo, p; 9-12, 1927.

ROHN, R.; FAIRCHILD, T. R.; DIAS-BRITO, D. **Microbialitos do Grupo Passa Dois, Permiano Inferior-Médio, Bacia do Paraná, estados de São Paulo e Paraná**, 2016.

SCHNEIDER, R. L. et al. **Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná**, 1974. (Nota técnica).

SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28., Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. v. 4, p.107-121

TINIVELLA, U.; GIUSTINIANI, M. An Overview of Mud Volcanoes Associated to Gas Hydrate System. **Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems**, p. 278, 2012.

WARREN, L. V. et al. A Formação Serra Alta, Permiano, no centro-leste do Estado de São Paulo, Bacia do Paraná, Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 1, p. 109–126, 2015.

YAMAMOTO, J. K. et al. A record of Permian subaqueous vent activity in southeastern Brazil. **Nature**, 438, p. 205-207, 2005.

