



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR E MODELAGEM
GEOLÓGICA DE CARBONATOS NEOPROTEROZÓICOS
DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ, GRUPO BAMBUÍ,
NA PEDREIRA GMD – PARAOPEBA – MG: UMA
CONTRIBUIÇÃO À GEOLOGIA DE RESERVATÓRIO*

AUTOR: Alex Rodrigues de Freitas

ORIENTAÇÃO: Prof. Dr. Alexandre Uhlein

N° 216

BELO HORIZONTE
DATA (11/05/2020)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

***CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR E MODELAGEM
GEOLÓGICA DE CARBONATOS NEOPROTEROZÓICOS
DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ, GRUPO BAMBUÍ,
NA PEDREIRA GMD – PARAPEBA – MG: UMA
CONTRIBUIÇÃO À GEOLOGIA DE RESERVATÓRIO***

VERSÃO FINAL

por

ALEX RODRIGUES DE FREITAS

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

Área de Concentração: Geologia Regional.

Orientação: Prof. Dr. Alexandre Uhlein.

BELO HORIZONTE
2020

F866c Freitas, Alex Rodrigues de.

2020 Caracterização multiescalar e modelagem geológica de carbonatos neoproterozóicos da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, na pedreira GMD - Paraopeba-MG [manuscrito] : uma contribuição à geologia de reservatório / Alex Rodrigues de Freitas. – 2020.

xii,150 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Alexandre Uhlein.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 102-114.

Inclui anexo.

1. Geologia – Minas Gerais – Teses. 2. Sedimentologia – Teses. 3. Rochas carbonáticas – Teses. 4. Modelagem geológica – Teses. I.Uhlein, Alexandre. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 55(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Caracterização multiescalar e modelagem geológica de carbonatos neoproterozóicos da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, na pedreira GMD - Paraopeba-MG: contribuição à geologia de reservatórios.

ALEX RODRIGUES DE FREITAS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL.

Aprovada em 11 de maio de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Alexandre Uhlein - Orientador
UFMG

Prof. Gabriel Jubé Uhlein
UFMG

Prof. Antonio Jorge Vasconcellos Garcia
UFS

Belo Horizonte, 11 de maio de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade concedida;

À Petrobrás e à FUNDEP pelo apoio financeiro e logístico que permitiram o desenvolvimento desse projeto de pesquisa;

Ao meu orientador e coordenador de projeto Prof. Alexandre Uhlein, por todo apoio, confiança, disponibilidade, discussões geológicas, suporte, e pela oportunidade.

Agradeço também ao Prof. Antônio Jorge Vasconcellos Garcia pela concepção inicial do projeto Camures-Diagênese, o que permitiu a parceria entre as Universidades de Minas Gerais e Sergipe, viabilizando assim a implementação da linha de pesquisa em geologia de reservatório na UFMG. Estou seguro que bons frutos sairão dessa parceria.

Agradeço ao dono do terreno onde a pedreira está instalada, o senhor Guilherme Mascarenhas Dalle Neto, pela autorização de entrada e acesso à pedreira o que permitiu a realização dos trabalhos de campo, fundamentais para a pesquisa.

Aos colegas de projeto, os geólogos Márcio Dantas e Thaís Keuffer, pela amizade, convivência, por toda troca de conhecimento, e pelo suporte técnico durante a execução dos trabalhos dessa pesquisa em Minas Gerais. Vocês foram fundamentais para essa pesquisa.

Aos demais colegas da Universidade Federal de Sergipe, em especial, Arthur e Samuel, pelo acolhimento, parceria e todo aprendizado passado durante os trabalhos de modelagem no Laboratório PROGEOLOGIA em Aracaju.

Aos colegas de pós-graduação, em especial aos da salinha: Márcio, Tobias, Fernando, Samuel, Sofia, Ana, Anderson, e todos os outros, por tornarem a jornada mais leve e divertida. Valeu pessoal, vocês são demais!

À minha família querida, minha mãe Edna, meu pai Sebastião, minha irmã Ana Paula e minha sobrinha Maria Gabriela, pelo amor incondicional, pelo incentivo sempre presente em suas palavras e pela compreensão de minha ausência em alguns momentos. Agradeço todos os dias pelo privilégio e benção de tê-los em minha vida;

Ao meu esposo, o também geólogo Marco Aurélio pela atenção, amor irrestrito, paciência, incentivos em gestos e palavras, e todo suporte emocional necessário em todas as fases desse trabalho. Obrigado meu querido por sempre estar ao meu lado e me mostrar que podemos ir muito além do que poderíamos imaginar;

Muito obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização desse ciclo!

*“O correr da vida embrulha tudo.
A vida é assim: esquentada e esfria,
aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem.”*

(Grande Sertão Veredas - Guimarães Rosa)

RESUMO

O presente trabalho versa sobre a análise em multiescala de rochas carbonáticas neoproterozóicas da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) que afloram em uma pedreira desativada em Paraopeba-MG. Aplicou-se parcialmente a metodologia de Caracterização Multiescalar de Reservatórios (CAMURES) que assume como premissa a caracterização de um afloramento análogo a partir da aplicação de diferentes métodos investigativos, em diferentes escalas de observação, variando desde escala de bacia, passando pela escala de reservatório, até a microescala petrofísica e diagenética. As rochas presentes na pedreira GMD compreendem cinco litofácies sedimentares: calcarenitos médios a finos maciços, brechas intraclásticas, calcarenitos finos com marcas onduladas assimétricas, calcarenitos médios com estratificação cruzada *hummocky* e, finalmente, litofácies de calcilutitos e siltitos (raros). As litofácies descritas representam ambientes de sedimentação plataformar, variando entre *shoreface-offshore*. Levantamentos de GPR (*Ground Penetrating Radar*) evidenciaram geometrias deposicionais como sigmóides, *hummockys* e padrões plano-paralelos. As análises petrográficas revelaram a presença de cinco microfácies carbonáticas e uma híbrida terrígena-carbonática: *grainstones* ooidais intraclásticos, *grainstones* intraclásticos, *grainstones* recristalizados, *wackestones* intraclásticos, *mudstones* e por fim, siltitos laminados. O ambiente deposicional dessas rochas aponta para uma deposição em plataforma carbonática marinha rasa, sob influência de ondas de tempestades, a partir da identificação de diversos ciclos tempestíticos. A análise estrutural da pedreira permitiu identificar três famílias de fraturas principais com direções N-S, NE-SW e NW-SE, geralmente subverticalizadas, cortando o grande afloramento que apresenta camadas subhorizontais. Os levantamentos de *gamma-ray* permitiram correlacionar lateralmente os quatro perfis levantados na base da pedreira, e serviram de base para um zoneamento faciológico que norteou a modelagem geológica 3D do afloramento da pedreira. A modelagem geológica levou em consideração um *workflow* que permitiu interpolar os dados de microfácies para definição da proporção e distribuição espacial dessas microfácies ao longo do afloramento. Os resultados mostraram predominância de microfácies de *grainstones* ooidais intraclásticos com cerca de 58% de presença, seguida pelas

microfácies de *wackestones* com 15%, siltito com 13%, *grainstones* intraclásticos com 12%, e *grainstones* recristalizados com 2%. A análise das litofácies carbonáticas, geometrias e arquitetura deposicionais, combinadas com dados micropetrográficos, tanto em lâminas delgadas como texturas ao Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, estruturas rúpteis identificadas, e dados da modelagem sugerem que a seção estudada da Formação Lagoa do Jacaré na Pedreira GMD tem potencial para um reservatório do tipo fraturado não convencional.

Palavras-chave: Sedimentologia, Grupo Bambuí, Carbonatos Neoproterozoicos, Modelagem Geológica 3D.

ABSTRACT

The present work features multiscale analysis of Neoproterozoic carbonate rocks of Lagoa do Jacaré Formation (BambuÍ Group) that outcrops in a deactivated quarry in Paraopeba - MG. The Multiscale Reservoir Characterization (CAMURES) methodology was partially applied, and it assumes as a premise the characterization of analogue outcrops using different investigative tools, in different scales of observation, ranging from basin scale, passing through reservoir scale, until petrophysics microscale. The rocks in GMD quarry comprise five sedimentary lithofacies: medium to fine grained massive calcarenites, intraclastic breaches, fine calcarenites with asymmetric ripple marks, medium grained calcarenites with hummocky cross-bedding, and finally, calcilutites and siltstones (rares). Those lithofacies represent platform sedimentary environment, in the shoreface-offshore transition. GPR (Ground Penetrating Radar) survey revealed depositional geometries such as sigmoidal, hummocky and parallel patterns. Petrographic analysis showed the presence of five carbonate microfacies and one hybrid terrigenous-carbonate: ooidal intraclastic grainstones, intraclastic grainstones, recrystallized grainstones, intraclastic wackestones, mudstones and laminated siltstones. Depositional environment of these rocks points to a deposition in a shallow marine carbonate platform, under storm waves influence, as identified in many tempestite cycles in the quarry. Structural analysis showed the presence of three fractures systems with principal directions N-S, NE-SW and NW-SE, subvertical in general, cutting the huge outcrop which present subhorizontal layers. Gamma-ray prospects allowed laterally correlate the four profiles prospected in the base of the quarry, and served as basis for a facies zoning that guided the 3D geological modelling of the quarry outcrop. The modelling used a workflow that interpolate microfacies data to define their spatial distribution and proportion along the entire outcrop. The results showed the predominance of oolitic intraclastic grainstones with about 58% of presence, followed by intraclastic grainstones with about 15%, siltites with 13%, wackestones with 12% and recrystallized grainstones with 2%. Carbonate lithofacies analysis, depositional architecture and geometry, in combination with micropetrographic data in thin section and textures observed in Scanning Electron Microscope (SEM), identified brittle structures, and modelled data

suggests that the studied section of the Lagoa do Jacaré Formation in the GMD Quarry has a potential for a fractured non-conventional reservoir type.

Keywords: Sedimentology, Bambuí Group, Neoproterozoic Carbonates, 3D Geological Modeling

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa rodoviário de acesso e localização da pedreira GMD. Imagem aérea da pedreira GMD (Fontes: Google Earth e Google Maps).....	16
Figura 2: Levantamento de GPR na pedreira. O carro com as antenas transmissora e receptora é arrastado e a unidade de controle realiza o imageamento da linha obtida. A roda do carro mede a distância percorrida (extensão da linha levantada).	18
Figura 3: Classificação de rochas carbonáticas baseada em aspectos texturais, proposta por Dunham (1962). Extraído de Dantas (2016).	20
Figura 4: Mapa geológico simplificado do cráton do São Francisco, mostrando a grande extensão do Grupo Bambuí na Bacia do São Francisco (em tracejado vermelho). (Modificado de Reis e Suss, 2016).....	23
Figura 5: Coluna estratigráfica simplificada da Bacia Intracratônica do São Francisco. (Modificado de Alkmim e Martins-Neto, 2001).....	24
Figura 6: Seção sísmica regional da Bacia do São Francisco com as principais unidades litoestratigráficas e estruturas marcadas, desde a Serra da Água Fria/Serra do Cabral em Minas Gerais, até a região de Cristalina em Goiás. (Extraído de Zalán e Romeiro-Silva, 2007).	25
Figura 7: Litoestratigrafia (Costa e Branco, 1961 e Dardenne, 1978) e estratigrafia de seqüências (Martins e Lemos, 2007) do Grupo Bambuí. (Modificado de Uhlein et al., 2017b). TST: Trato de Sistemas Transgressivo; RST: Trato de Sistemas Regressivo; MFS: Superfície de Inundação Máxima.....	29
Figura 8: Compartimentação da Bacia do São Francisco e detalhamento do acervo estrutural relacionado ao Grupo Bambuí. (Modificado de Fragoso, 2011).	32
Figura 9: Dados de ocorrências de gás natural e coque na Bacia do São Francisco em Minas Gerais. (Extraído de Reis, 2018).....	35
Figura 10: Tipos de microporosidade de rochas carbonáticas baseado em Choquette e Pray, 1970. (Extraído de Dantas, 2016).	38
Figura 11: Hierarquia das heterogeneidades de depósitos sedimentares, tendo como premissa a observação em diferentes escalas. (Extraído de Paim et al., 2003).	40
Figura 12: Proposta geral da metodologia CAMURES para modelagem de reservatórios análogos e in-situ. (modificado de Garcia et al., 2003).....	43
Figura 13: Carta de submissão do artigo “Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG” à revista Geologia USP: Série Científica.	46
Figura 14: Mapa geológico simplificado da região sudeste da Bacia do São Francisco, com a localização da Pedreira GMD. (Modificado de Féboli, 2008, Tuller, 2009, CODEMIG & CPRM, 2014; Uhlein et al., 2017).	50
Figura 15: Litoestratigrafia regional do Grupo Bambuí (Dardenne, 1978) na porção sudeste do Cráton do São Francisco.....	52
Figura 16: Principais litofácies e estruturas presentes na pedreira GMD: A) Calcarenito laminado com presença de marcas onduladas, laminações truncadas, e plano-paralelas;	

B) Detalhe de fina camada de siltito entre calcarenitos; C) Parte de uma estratificação cruzada por influência de ondas (hummocky). D) Detalhe de marcas onduladas assimétricas em calcarenito. E) Brecha intraclástica maciça, com geometria lenticular, gradando a calcarenito com intraclastos . F) Disposição de camadas onduladas e amalgamadas..... 58

Figura 17: Fotomosaico representativo da pedreira GMD com a representação dos perfis sedimentares levantados. O datum é representado por uma camada de siltito bem identificada em todos os perfis laterais..... 59

Figura 18: Fotos das principais microfácies. A) Grainstone ooidal intraclástico (polarizadores paralelos) com detalhe para veio estilolítico; B) Detalhes de cimento blocoso, oóides concêntricos bem preservados e intraclastos subarredondados. (polarizadores paralelos); C) Grainstone intraclástico com intraclastos subarredondados piritizados. Detalhe de cimento blocoso. (polarizadores paralelos); D) Grainstone intraclástico, com detalhe de intraclasto piritizado. (polarizadores cruzados); E) Mudstone com detalhe para veio preenchido por calcita grosseira (polarizadores cruzados); F) Siltito com matriz carbonática. (polarizadores cruzados)..... 62

Figura 19: Imageamento através de MEV. A) Microfraturamento marcado em porção com matriz micrítica com pequenos poros dispersos pela lâmina, e presença de cimento espático recristalizado; B) Microporosidade representada por fraturamentos na matriz e possíveis arrancamentos de grãos do substrato. C) Amostra marcando grãos bem formados de calcita, envolvendo oóides; D) Detalhe de poro intergranular..... 63

Figura 20: Imagem aérea de localização das linhas de GPR levantadas na pedreira. Fonte: Google Earth..... 64

Figura 21: Linhas 1, 2 e 3 processadas e interpretadas. Dentre as geometrias internas marcadas pelos estratos destacam-se os padrões subparalelos, sigmoidais, estruturas de hummocky e truncamentos..... 65

Figura 22: Perfis levantados na bancada inferior da pedreira, com indicação das principais microfácies definidas, e correlação lateral desses perfis a partir dos resultados de raios gama. Assinaturas gamaespectrométricas similares foram agrupadas em dez zonas, e as principais anomalias forma marcadas com setas coloridas (azul, verde, vermelho e laranja) nos perfis..... 67

Figura 23: Diagrama de rosetas das principais fraturas observadas na pedreira GMD..... 69

Figura 24: Relação das fraturas presentes na pedreira GMD: A) Família 1 sendo cortada por fraturas da família de 2; B) Família 2 sendo cortada por fraturas da família 1; C) Família 3 cortando as famílias 1 e 2; D) Disposição das fraturas 1, 2 e 3 no chão da pedreira GMD..... 70

Figura 25: Formação de uma fácies tempestítica idealizada, com as fases erosionais e deposicionais. Modificado de Plint (2010)..... 71

Figura 26: Bloco diagrama representativo da sedimentação por ciclos de tempestade. Local provável da sedimentação da Formação Lagoa do Jacaré na transição shoreface/offshore em vermelho. Modificado de Plint (2010)..... 72

Figura 27: Workflow adotado nos trabalhos de modelagem geológica executadas na pedreira GMD. (Modificado de Caers 2005)..... 83

Figura 28: Organograma detalhado da modelagem de fácies feita pela metodologia CAMURES.....	84
Figura 29: Correlation View dos quatro poços levantados na base da pedreira GMD mostrando a correlação lateral entre os poços, bem como o preenchimento dos intervalos com as microfácies, e definição do zoneamento inicial.	87
Figura 30: Perfis verticais importados no RMS como pseudopoços e os well-picks que definem o zoneamento estratigráfico. Com exagero vertical.	89
Figura 31: Horizontes gerados a partir da correlação dos well-picks. As cores vermelhas evidenciam, em cada horizonte gerado, as topografias mais elevadas, enquanto que as cores azuis, topografias mais baixas. A imagem apresenta exagero vertical.	89
Figura 32: Bloco 3D com o zoneamento gerado pelo RMS. Apresenta exagero vertical.	90
Figura 33: Intersection view com os perfis 1, 2, 3 e 4 levantados na pedreira GMD. Contém exagero vertical.	91
Figura 34: Intersection view do Grid 3D das zonas do modelo da pedreira. Notar a variação de células verticais em cada zona. Com exagero vertical.....	92
Figura 35: Blocked wells criados para os perfis descritos na pedreira. Em A os blocked wells dispostos em 3D view. As cores em cinza escuro representam ausência de dados de microfácies nesses locais. Em B está representada a comparação dos blocked gerados com o dado original. A coluna mais à esquerda representa o valor original a ser modelado, a coluna da direita representa o blocked well gerado, com edições pontuais necessárias apontadas no quadro vermelho.	93
Figura 36: A) Bloco modelado da pedreira com informações sobre a distribuição das microfácies na pedreira GMD. B) Detalhe em Intersection View das fácies e horizontes modelados.	95
Figura 37: Histograma comparativo entre as proporções de fácies modeladas e fácies imputadas na etapa de criação dos blocked wells.....	96
Figura 38: Proporção da distribuição das microfácies em todo o modelo em todas as zonas. A linha horizontal preta define cada zona.....	97

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	15
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O GRUPO BAMBUÍ	22
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 ESTRATIGRAFIA DO GRUPO BAMBUÍ.....	26
2.3 TRABALHOS ANTERIORES SOBRE ESTRATIGRAFIA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ.....	29
2.4 GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	31
2.5 GEOCRONOLOGIA DO GRUPO BAMBUÍ.....	32
2.6 OCORRÊNCIAS DE GÁS NATURAL NA BACIA DO SÃO FRANCISCO	34
CAPÍTULO 3: SÍNTESE SOBRE A METODOLOGIA CAMURES	37
3.1 O ESTUDO DE AFLORAMENTOS ANÁLOGOS	37
3.2 RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS DE HIDROCARBONETOS.....	40
3.3 A METODOLOGIA CAMURES	42
CAPÍTULO 4: ARTIGO 1	45
4.1 INTRODUÇÃO.....	49
4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	50
4.3 MÉTODOS.....	53
4.4 RESULTADOS	56
4.4.1- Associação de Fácies	56
4.4.2- Petrografia	60
4.4.3 – Radar de Penetração no Solo – GPR (<i>Gound Penetrating Radar</i>)	63
4.4.4 – Perfilagem de Raios Gama	66
4.4.5 - Geologia Estrutural.....	68
4.5 DISCUSSÕES.....	70
4.6 CONCLUSÕES.....	74
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
CAPÍTULO 5: MODELAGEM GEOLÓGICA 3D	80
5.1 INTRODUÇÃO.....	80
5.2 MODELAGEM 3D DA PEDREIRA GMD	85
5.2.1 Ground Penetrating Radar (GPR)	85

5.2.2	Perfis Verticais (Pseudo-Poços).....	86
5.2.3	Zoneamento Estratigráfico.....	87
5.2.4	Grid 3D.....	91
5.2.5	Modelagem de Fácies.....	94
CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		102
ANEXO I: DESCRIÇÃO DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS.....		115

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente dissertação apresenta os resultados de uma investigação científica a partir da utilização da metodologia CAMURES (Caracterização Multiescalar de Reservatórios) (Garcia *et al.*, 2015), na forma de levantamentos geológicos, faciológicos, estruturais, petrográficos e geofísicos de carbonatos de parte da Formação Lagoa do Jacaré. Esses levantamentos foram realizados na pedreira GMD, localizada na porção central do estado de Minas Gerais, município de Paraopeba. Os dados levantados embasaram ainda trabalhos de modelagem geológica e faciológica da unidade carbonática na Pedreira GMD. O afloramento foi estudado sob a ótica de afloramento análogo a reservatórios de hidrocarbonetos.

A motivação principal para a realização deste trabalho surgiu da busca pela compreensão de possíveis ocorrências de gás natural na Bacia do São Francisco, descritas principalmente por Fugita e Clark-Filho (2001), Martins *et al.* (1993) e Reis (2018), e permitir a análise das rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré sob o contexto de análogos de reservatórios carbonáticos, amplamente estudados em diversos locais por constituírem a principal litologia associada aos reservatórios dos depósitos de hidrocarbonetos do pré-sal brasileiro. Nesse sentido, ocorreu a ideia de trazer essa metodologia, já muito bem aplicada nos carbonatos com coquinas da Formação Morro do Chaves entre outras unidades da Bacia de Sergipe-Alagoas (Lima *et al.*, 2015; Garcia *et al.*, 2015), e aplicá-la nas rochas do Grupo Bambuí para compreender melhor essas rochas que representam um dos reservatórios possíveis para as ocorrências de gás na Bacia do São Francisco.

A dissertação foi estruturada em seis capítulos, de forma que o primeiro capítulo contempla informações introdutórias; o segundo capítulo apresenta uma revisão dos conhecimentos relativos ao Grupo Bambuí; o terceiro capítulo aborda de forma detalhada a metodologia CAMURES aplicada nos trabalhos dessa dissertação; o quarto capítulo é composto de um artigo científico submetido ao periódico “Geologia USP – Série Científica” com os resultados dos levantamentos realizados durante os trabalhos de campo desenvolvidos na pedreira GMD; o quinto capítulo versa sobre os trabalhos de modelagem

geológica e faciológica desenvolvidos no laboratório PROGEOLOGIA da Universidade Federal de Sergipe; e finalmente, o sexto capítulo apresenta considerações finais sobre todo o trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos principais do trabalho englobaram a caracterização das rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré e envolveram:

- Levantamento de perfis colunares e análise faciológica de detalhe da unidade na pedreira GMD, definição das principais litofácies aflorantes, para reconhecimento de fácies sedimentares, sistemas deposicionais e processos deposicionais e pós deposicionais;
- Utilização de ferramentas geofísicas (GPR e *gama-ray*) no afloramento para análise das heterogeneidades e arquiteturas deposicionais da unidade;
- Reconhecimento, análise e levantamento em campo das principais estruturas geológicas de faturamento rúptil que ocorrem na pedreira;
- Análises petrográficas com microscópio convencional e com Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV em amostras do afloramento para definição das principais microfácies carbonáticas, além do reconhecimento de porosidade e microporosidade presentes nas rochas da unidade;
- Integração dos dados obtidos para embasar as atividades de modelagem geológica e faciológica 3D da pedreira GMD, para verificação da distribuição das fácies ao longo do afloramento.

1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

Para desenvolvimento deste trabalho foi escolhida uma pedreira desativada, com paredões preservados, cerca de 21.000 m² de área, e aproximadamente 40 m de espessura da Formação Lagoa do Jacaré exposta.

A partir de Belo Horizonte, o acesso ocorre pela BR-040 até o município de Paraopeba, que fica a cerca de 100 km de distância. A pedreira fica a 3 km do centro do município, e o acesso ocorre por estrada local não pavimentada.

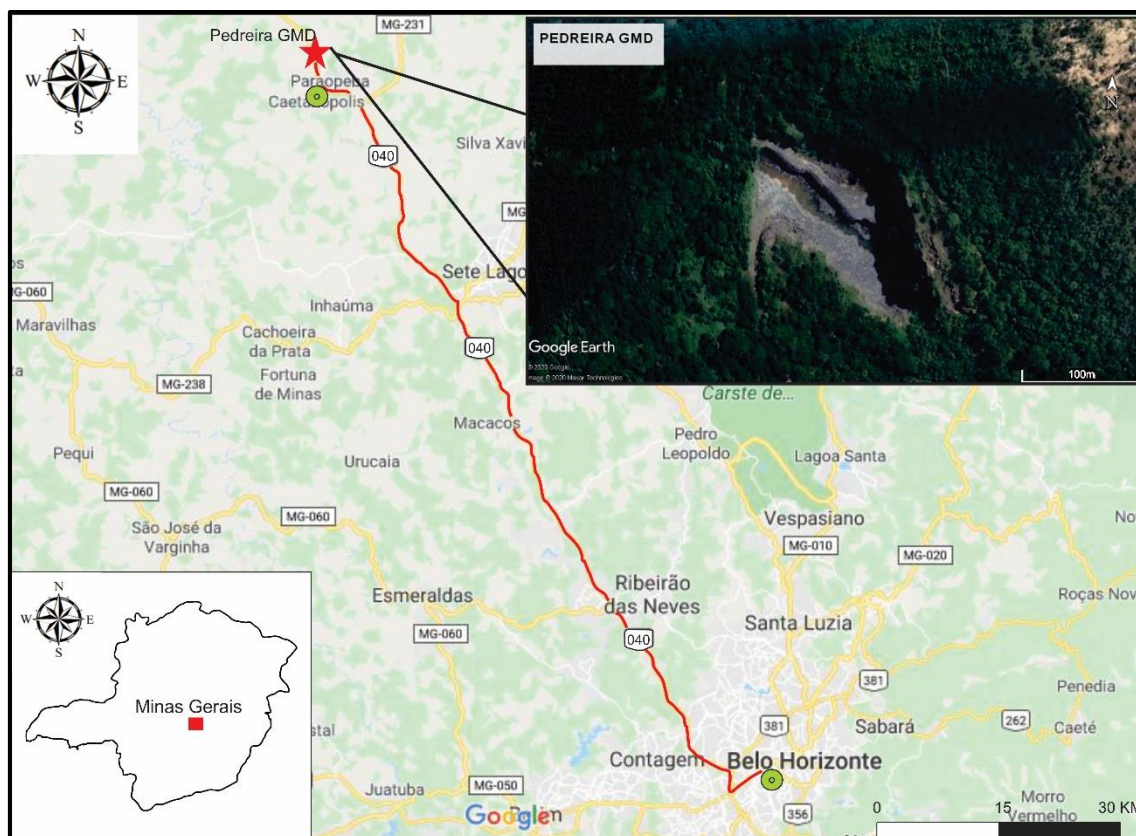


Figura 1: Mapa rodoviário de acesso e localização da pedreira GMD. Imagem aérea da pedreira GMD (Fontes: Google Earth e Google Maps).

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho envolveu a aplicação de métodos indiretos e diretos de investigação e descrição do afloramento, em diferentes escalas na pedreira. Diante disso, faz-se necessário:

- Revisão bibliográfica que envolveu análise de artigos, mapas, teses, dissertações e outros documentos anteriormente desenvolvidos na região da Bacia Bambuí, especialmente em relação à área alvo, na porção central do Cráton do São Francisco, para entendimento da evolução dos conhecimentos já existentes sobre a região. Esta etapa envolveu ainda pesquisas acerca das ferramentas investigativas usadas durante execução dos trabalhos.
- Mapeamento sistemático do afloramento alvo, utilizando-se das técnicas de análise estratigráfica e litofaciológica que envolveu levantamento de perfis colunares de detalhe, bem como subdivisão e sucessões de fácies. Para descrever diretamente o afloramento utilizou-se de técnicas de rapel

para acesso às rochas. Os trabalhos de campo ocorreram em duas campanhas em junho de 2018 e abril de 2019.

- Aquisição e posterior processamento de dados de GPR (Ground Penetrating Radar) no afloramento alvo (pedreira GMD) para imageamento raso de feições em subsuperfície com objetivo de auxiliar na interpretação da geometria e arquitetura deposicionais. Este método geofísico utiliza a emissão de pulsos eletromagnéticos para detectar estruturas e feições geológicas em subsuperfície (Annan, 2002). Tal método baseia-se na emissão de ondas eletromagnéticas (EM), por meio de uma antena transmissora, com tempo da ordem de nanosegundos (10^{-9} s) e frequência que varia de 16 a 2600 MHz (Lima, 2017). Ainda segundo a autora, quando a EM encontra materiais de propriedades eletromagnéticas diferentes, a velocidade de propagação se altera, e parte dela é refletida e captada por uma antena receptora em superfície, e uma outra parte sofre difração e atravessa para o outro meio até encontrar uma nova superfície de contraste de propriedade, ou até se atenuar no meio em questão. O tempo decorrido entre a emissão do pulso eletromagnético e a captação pela antena receptora da porção refletida da onda após atingir o alvo é chamado de tempo duplo. E é justamente esse tempo que é registrado e armazenado por uma unidade de controle. O aparelho utilizado durante os trabalhos é da marca *Geophysical Survey Systems* modelo GSSI SIR-2000 com antenas de frequência 160 MHz.

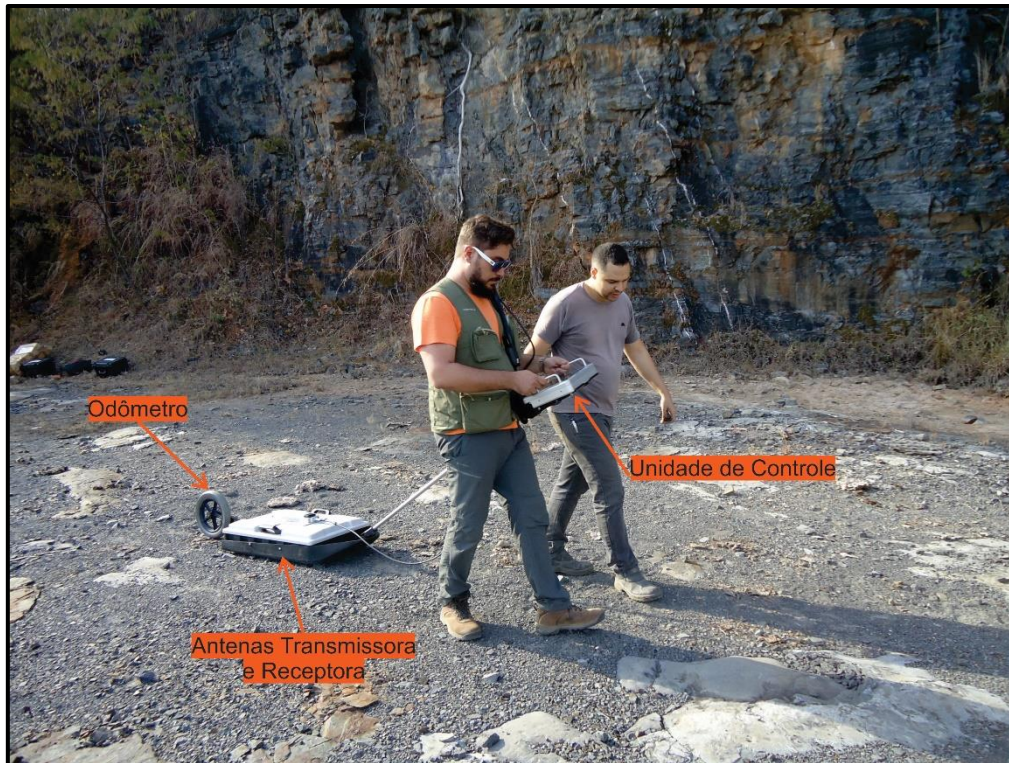


Figura 2: Levantamento de GPR na pedreira. O carro com as antenas transmissora e receptora é arrastado e a unidade de controle realiza o imageamento da linha obtida. A roda do carro mede a distância percorrida (extensão da linha levantada).

Após a leitura da linha levantada, os dados brutos são submetidos a operações de processamento, que envolveram etapas de eliminação de ruídos superficiais, amplificação e realce de sinais de interesse, além de correções topográficas. A tabela 1 a seguir expõem as etapas de processamento adotadas nas linhas levantadas. Ao todo foram levantadas 35 linhas de GPR nas bancadas inferiores e superiores da pedreira sendo que, para confecção do artigo, foram processadas e interpretadas as três que melhor representaram as geometrias deposicionais encontradas na pedreira.

Tabela 1: Atividades de processamento das linhas brutas de GPR levantadas na pedreira GMD.

PROCEDIMENTO	DESCRIÇÃO
Ganho Inicial – ACG-Gain	Realça as linhas do radargrama obtido de modo a enquadrar um melhor intervalo de tempo para observação dos dados obtidos.
Remoção de <i>Header Gain</i>	Remove ruídos incorporados ao radargrama durante a aquisição dos dados.
Ajuste de Tempo Zero	Remove os dados nulos no topo do radargrama obtido de modo a se eliminar as leituras quando a onda emitida ainda não tinha retornado para a antena receptora.
Remoção de <i>Background</i>	Remove dados de ondas aéreas e/ou de superfície incorporados ao radargrama.
Aplicação de Filtro Passa-Banda	Remove ruídos em intervalos maiores e menores do que a janela de frequência de interesse.
Conversão de tempo-profundidade (Time-depth)	Cria-se um modelo de velocidade ($v_{\text{calcário}} = 0,120$ m/ns) e, a partir disso, transforma-se as informações obtidas em tempo (ns) em profundidade (m).
Correção Topográfica	Georreferencia cada linha de radargrama obtida e com isso permite obter as informações de altitude (z) em cada ponto da linha.

- Aquisição e posterior processamento de dados de gamaespectrometria para uma melhor correlação dos perfis colunares confeccionados. Este método geofísico consiste em medir a concentração de U, Th e K, além de contagem total (CT) em rochas, sedimentos e solos através da detecção dos raios gama emitidos durante decaimento radioativo natural desses elementos nesses materiais (Ferreira, 2010). A utilização desse método é de relativa importância pois permite correlacionar estratos, delimitar preliminarmente tipos litológicos e estimar frações argilosas e arenosas (Ellis e Singer, 2008). O processamento compreende basicamente a construção de gráficos com as medidas de radiação levantadas, de forma que se possa identificar picos e quedas de emissão natural de radiação. O aparelho utilizado nos trabalhos é da marca *Radiation Solutions*, modelo RS-230.

- Análise petrográfica a partir da descrição de lâminas delgadas confeccionadas de amostras da pedreira. Representa etapa de suma importância para o entendimento do arcabouço sedimentar das fácies, bem como classificação dos grãos sedimentares e análise da porosidade existente nas rochas. A classificação adotada neste trabalho contempla àquela proposta por Dunham (1962) para texturas de rochas carbonáticas (figura 3). Foi realizada ainda a análise por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para reconhecimento das fases diagenéticas e de cimento, além da verificação de existência de microporosidade nas amostras. Ao todo foram confeccionadas 36 lâminas, sendo 21 lâminas delgadas, 14 lâminas delgadas impregnadas com resina epóxi azul, e 1 que foi polida e metalizada pra os trabalhos no MEV. As descrições das lâminas estão dispostas em anexo a esse volume.

TEXTURA DEPOSICIONAL RECONHECÍVEL					TEXTURA DEPOSICIONAL NÃO RECONHECÍVEL
Componentes originais não interligados durante a deposição			Suportado por grãos	Componentes originais interligados durante a deposição	
Contém lama carbonática (partículas de tamanho argila e silte fino, inferior a 20 microns)					
Suportado por lama carbonática		Suportado por grãos			
< 10% grãos	> 10% grãos	> 10% lama carbonática	< 10% lama carbonática		
<i>Mudstone</i>	<i>Wackestone</i>	<i>Packstone</i>	<i>Grainstone</i>	<i>Boundstone</i>	Carbonato Cristalino

Figura 3: Classificação de rochas carbonáticas baseada em aspectos texturais, proposta por Dunham (1962). Extraído de Dantas (2016).

- Modelagem 3D geológica e faciológica, a partir da integração dos dados levantados em campo e dos dados de petrografia. Para tanto foi utilizado o software RMS 11 da empresa Roxar-Emerson, com licença disponibilizada pelo laboratório Progeologia da Universidade Federal de Sergipe. O software promove a interpolação de dados conhecidos,

discretos ou contínuos, dos perfis levantados, e procede o preenchimento dos espaços desconhecidos (incertezas) no modelo de blocos gridado com os dados dos vizinhos conhecidos mais prováveis. Dessa forma o produto é um modelo com a distribuição das fácies na pedreira o que promove um entendimento da dinâmica de deposição das rochas da pedreira.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O GRUPO BAMBUÍ

2.1 INTRODUÇÃO

O Grupo Bambuí constitui importante unidade Neoproterozóica que recobre a porção sul do Cráton do São Francisco (Alkmim *et al.*, 1993; Alkmim e Martins-Neto, 2001; Martins e Lemos, 2007) (Figura 4). A unidade está com contato normal com o embasamento ao sul da BSF e em contato tectônico com orógenos Araçuaí a leste, Brasília a oeste, e Rio Preto a noroeste (Zalán e Romeiro-Silva, 2007). É composto por um espesso pacote de rochas carbonáticas alternadas com rochas siliciclásticas finas depositadas em um contexto de bacia *foreland* durante a edificação da faixa Brasília a oeste do Cráton do São Francisco (Dardenne, 2000; Martins-Neto e Alkmim, 2001; Martins-Neto, 2009; Kuchenbecker, 2011). A espessura desse pacote argilo-carbonático pode variar bastante, e compreende em média de 600 a 1.000 m, podendo localmente chegar a 3.000 metros (Dardenne, 1978, 2000; Reis e Suss, 2016).

A Bacia do São Francisco (BSF) representa uma bacia intracratônica que engloba unidades proterozóicas e fanerozóicas, com cerca de 350.000 km² de extensão, ocupando áreas dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Tocantins (Alkmim e Martins-Neto, 2001; Zalán e Romeiro-Silva, 2007). O embasamento da bacia compreende complexos TTG arqueanos, além de supracrustais e magmáticas intrusivas e extrusivas relativas ao Evento Transamazônico (Martins-Neto e Alkmim, 2001). O preenchimento da BSF (figura 5) compreende pacotes siliciclásticos e metasiliciclásticos mesoproterozóicos do Supergrupo Espinhaço, rochas argilo-carbonáticas neoproterozóicas do Grupo Bambuí, bem como unidades fanerozóicas representadas por sedimentos glaciogênicos continentais do Grupo Santa Fé, rochas siliciclásticas dos Grupos Areado e Urucuia, além de vulcânicas kamafugíticas do Grupo Mata da Corda (Alkmim e Martins-Neto, 2001; Sgarbi *et al.*, 2001). O trabalho de Sgarbi *et al.*, 2001 descreve de forma detalhada o registro fanerozóico na BSF, nomeando de Bacia Sanfranciscana o pacote de

rochas depositadas nesse Período. Zalán e Romeiro-Silva, 2007 publicaram importante trabalho sobre a estratigrafia e arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco a partir de dados de levantamentos sísmicos na bacia, e apresentaram seções sísmicas regionais de toda a BSF (figura 6).

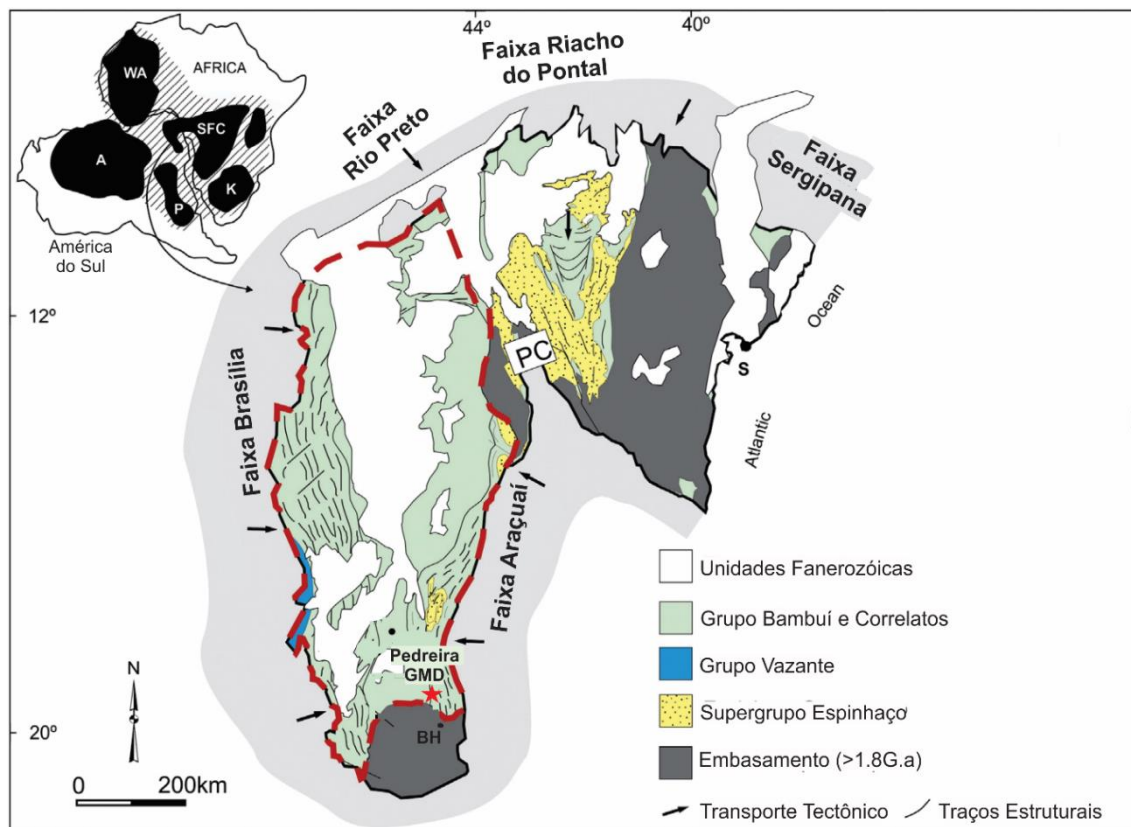


Figura 4: Mapa geológico simplificado do cráton do São Francisco, mostrando a grande extensão do Grupo Bambuí na Bacia do São Francisco (em tracejado vermelho). (Modificado de Reis e Suss, 2016).

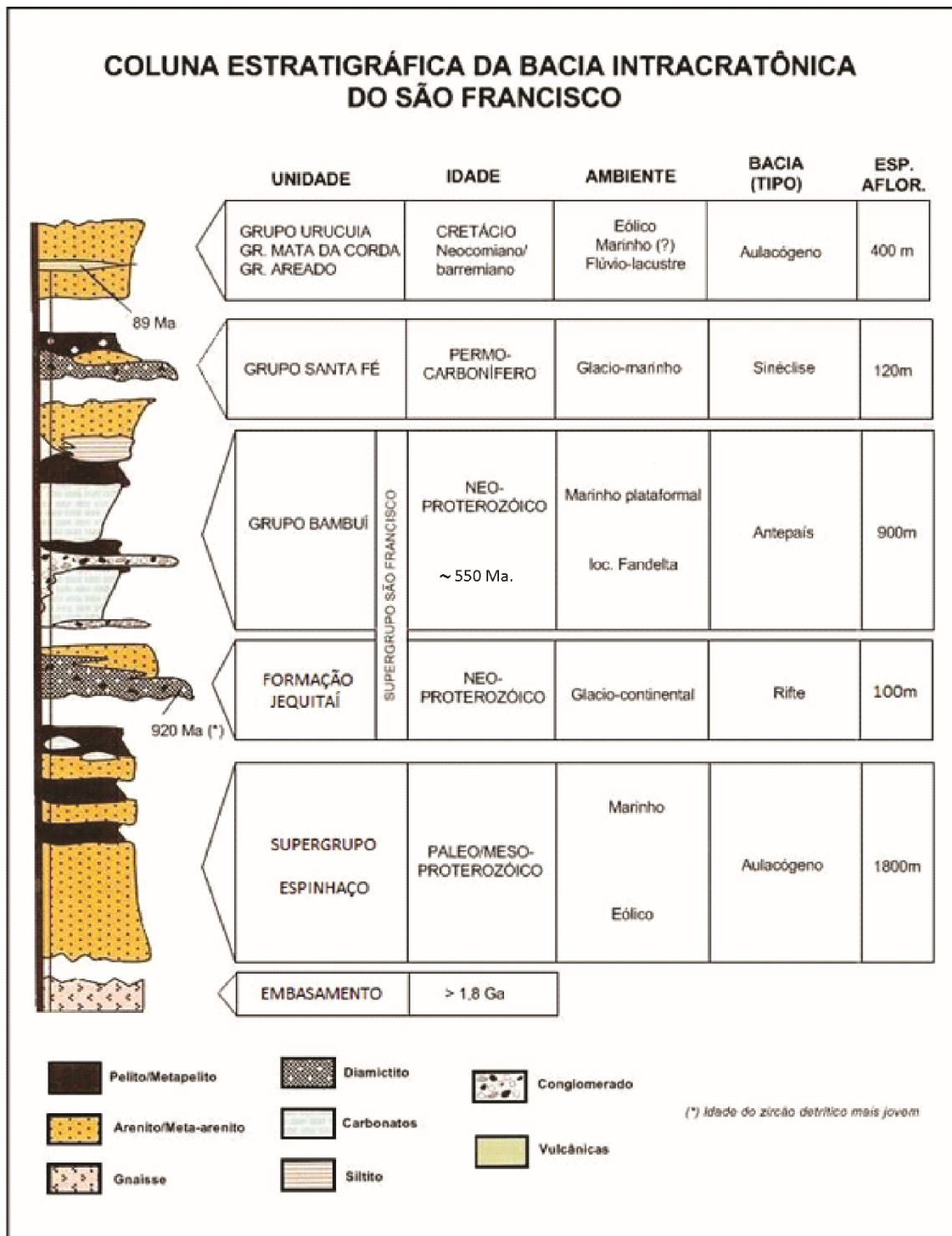


Figura 5: Coluna estratigráfica simplificada da Bacia Intracratônica do São Francisco. (Modificado de Alkmim e Martins-Neto, 2001).

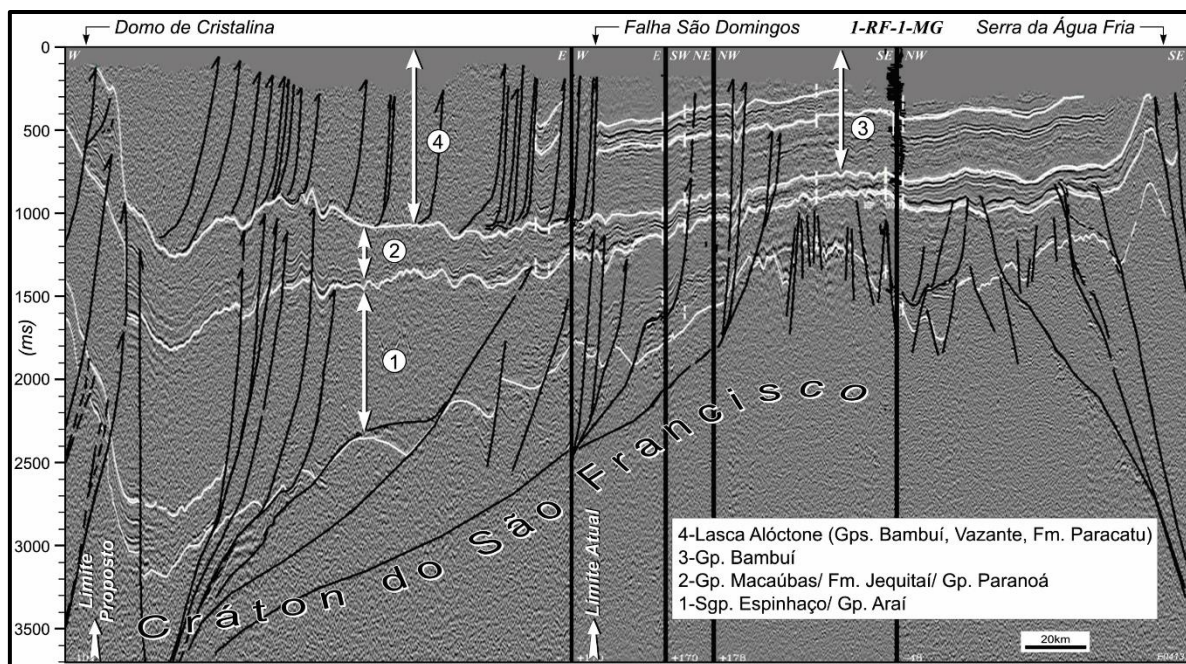


Figura 6: Seção sísmica regional da Bacia do São Francisco com as principais unidades litoestratigráficas e estruturas marcadas, desde a Serra da Água Fria/Serra do Cabral em Minas Gerais, até a região de Cristalina em Goiás. (Extraído de Zalán e Romeiro-Silva, 2007).

O trabalho de Uhlein *et al.* (2017a) apresenta um roteiro de campo no qual propõe um dia de visita a unidades da Bacia do São Francisco e três dias a unidades da Faixa Araçuaí. As visitas em campo contemplam importantes unidades do Grupo Bambuí, na Bacia do São Francisco, e do Supergrupo Espinhaço, em regiões da Faixa Araçuaí, entre as regiões de Belo Horizonte, passando por Sete Lagoas e Paraopeba, até Diamantina e cidades vizinhas.

As primeiras observações das rochas que compreendem o Grupo Bambuí remontam ao Barão von Eschwege (1833), que na região de Pirapora descreveu as rochas da unidade como Terrenos de Transição “*Ubergangsgebirge*”. Posteriormente, Derby (1880), que descreveu em detalhe as rochas aflorantes ao longo dos rios São Francisco e das Velhas. Porém, o termo Bambuí somente foi introduzido na literatura por Rimann (1917) que descreveu ardósias e calcários na região da cidade de Bambuí. Freyberg (1932) observou diferenças tectônicas entre as rochas do vale do Rio das Velhas e da Serra do Espinhaço, e procedeu a divisão da “Série Bambuí” em “Camadas Gerais”, horizontalizadas, e que ocupam a porção central de Minas Gerais, e “Camadas Indaiá”, dobradas e deformadas, mais próximas à Serra do Espinhaço.

2.2 ESTRATIGRAFIA DO GRUPO BAMBUÍ

A primeira litoestratigrafia global da então chamada “Série Bambuí” foi proposta por Costa e Branco (1961) ao longo da rodovia BR-040 no trecho entre Belo Horizonte-MG e Brasília-DF. Os autores dividiram as rochas da unidade em três Formações da base para o topo: Carrancas, Sete Lagoas e Rio Paraopeba, sendo esta última subdivida nos membros Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Três Marias e Serra da Saudade. Posteriormente, ao encontrar dificuldade na utilização da coluna anteriormente definida, Barbosa (1965) propõe uma nova divisão das rochas da unidade, elevando à condição de Formação os membros anteriormente descritos por Costa e Branco (1961). O trabalho de Braun (1968) eleva a série Bambuí a status de Grupo e divide a unidade nas Formações Paranoá (arenosa basal), Paraopeba (intermediária carbonática-siliciclástica) e finalmente a Formação Três Marias arenosa.

Dardenne (1978) promoveu a revisão da estratigrafia do Grupo Bambuí na região central do Brasil e propôs a subdivisão da unidade em seis Formações, incluindo como unidade basal, a Formação Jequitáí glaciogênica, composta de paraconglomerados com seixos de calcários, chert, gnaisses e xistos. Acima da unidade basal, o autor descreve a Formação Sete Lagoas, predominantemente carbonática e dolomítica, com intercalações de margas e pelitos. Acima, ocorre a Formação Serra de Santa Helena, constituída de siltitos e folhelhos acinzentados a esverdeados e que separa os calcários das Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré. A Formação Lagoa do Jacaré compreende, segundo o autor, alternância de calcários oolíticos e psolíticos, cinza-escuros, fétidos quando percutidos e com aspecto lenticular, brechas intraclásticas intercaladas com siltitos e margas esverdeadas. Acima dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré apresentam-se os folhelhos e argilitos esverdeados que passam progressivamente a siltitos arcoseanos da Formação Serra da Saudade. Por fim, afloram os arenitos e arcóseos cinza a esverdeados da Formação Três Marias.

Dardenne (1981) apresentou a divisão do pacote sedimentar do Bambuí em três megaciclos regressivos em uma sucessão do tipo *shallowing upward*, a partir de uma rápida transgressão regional que depositou fácies sublitorâneas, ocorrendo a partir daí regressões progressivas para depositar fácies litorâneas

até, no caso da Formação Três Marias, fluviais. O trabalho de mestrado de Lima (2005) realizou uma compilação de dados combinando os trabalhos de Dardenne 1978 e 1981 (Tabela 2).

Tabela 2: Compilação da litoestratigrafia e ciclos shallowing upwards do Grupo Bambuí, baseada em Dardenne (1978 e 1981) e ambientes de sedimentação. (Modificado de Lima, 2005).

Formação	Características Litológicas	Espessura (m)	Sequência	Ambientes de sedimentação
Três Marias	Siltitos, Arenitos e Arcóseos cinzas a verde-escuros	~100	Megaciclo I (Argilo-arenoso)	Ambiente fluvial. Ambiente marinho à sublitorâneo, alternante. Ambiente marinho litorâneo, agitado, submetido à influência das ondas e correntes de maré. Exposição subaérea temporária na zona intermaré.
Serra da Saudade	Folhelhos, argilitos e siltitos verdes, com lentes de calcário subordinadas	25-200		
Lagoa do Jacaré	Calcários oolíticos e psolíticos, cinza escuros, fétidos, siltitos e margas.	0-100	Megaciclo II (argilo-carbonatado)	Ambiente marinho litorâneo, agitado, submetido a influência das ondas e correntes de maré.
Serra de Santa Helena	Folhelhos e siltitos cinza a cinza-esverdeados	220-150		
Sete Lagoas	Calcários dolomíticos, e calcários micro-cristalinos finamente laminados, de cor cinza. Dolomitos bege litográficos, laminados com intraclastos, oólitos e estromatólitos colunares.	250-200	Megaciclo III (argilo-carbonatado)	Ambiente marinho, sublitorâneo, abaixo do nível de base das ondas e correntes de maré, profundidade moderada. Ambiente plataformal.
Jequitaiá	Paraconglomerado com matriz argilosa esverdeada e seixos de quartizitos, calcários, dolomitos, cherts, gnaisses, micaxistos, granitos e rochas vulcânicas	0-20		Ambiente Glacial.

Outros estudos permitiram a identificação de três unidades de ocorrências locais na bacia Bambuí. Costa e Branco (1961), Martins-Neto (2009) e Uhlein *et al.* (2016) descrevem a Formação Carrancas no sudeste da bacia, como a unidade basal do Grupo Bambuí nessa região. Essa formação é composta por um pacote de cerca de 80 metros de espessura de conglomerados, arenitos, folhelhos e dolomitos que preenchem grábens formados por rifteamentos continentais do embasamento sul do cráton (Uhlein *et al.*, 2013; 2016), e que são considerados como pré-glaciação Jequitaiá. No sudoeste da bacia, Castro e

Dardenne (2000), definem a ocorrência da Formação Samburá, que compreende um pacote de conglomerados, arenitos e siltitos depositados em contato com unidades sin-orogênicas da Faixa Brasília, relacionados a um sistema de *fan delta*. Ainda no oeste da bacia, ocorre a Formação Lagoa Formosa formada de intercalações de arenitos, calcários, conglomerados e formações ferríferas do tipo jaspelito (Seer *et al.*, 1987; Uhlein *et al.*, 2011).

Trabalhos envolvendo estratigrafia de sequências no Grupo Bambuí foram primeiramente desenvolvidos por Chiavegatto (1992) que determinou oito litofácies sedimentares para a Formação Três Marias, na porção meridional da Bacia do São Francisco, associadas a ambiente plataformal tempestítico e a ambiente de mar alto. Posteriormente, Martins e Lemos (2007) desenvolveram importante trabalho nas sequências neoproterozóicas da Bacia do São Francisco, e definiram sequências deposicionais e tratos de sistemas para o Grupo Bambuí, bem como modelo deposicional da unidade.

Ainda no contexto de estratigrafia de sequências, Uhlein *et al.* (2017b) reconhecem cinco sequências transgressivo-regressivas de segunda ordem para o Grupo Bambuí (figura 7). A Sequência 1 seria iniciada por sedimentos terrígenos continentais da base da Formação Carrancas sendo recobertos por sedimentos marinhos transgressivos (folhelhos escuros e argilitos) durante uma máxima transgressão. Em um momento regressivo subsequente, teriam sido depositados os siltitos e dolomitos da porção superior da Formação Carrancas e os arenitos e diamictos glaciais da Formação Jequitaí. A Sequência 2 representa um trato de sistema transgressivo responsável pela deposição dos carbonatos de capa da Formação Sete Lagoas. No topo da Sequência 2 é descrito um trato de sistemas regressivo com o aparecimento de intercalações de níveis dolomitizados e silicificados. A Sequência 3 começa com uma transgressão e deposição de folhelhos e siltitos da Formação Serra de Santa Helena sobre os carbonatos da Formação Sete Lagoas. Posteriormente, um ciclo regressivo teria sido responsável pelo desenvolvimento de depósitos tempestíticos e precipitação de calcários oolíticos da Formação Lagoa do Jacaré em uma rampa carbonática. A Sequência 4 engloba os siltitos e argilitos da Formação Serra da Saudade que se depositaram durante evento transgressivo que afogou os calcários de rampa da Formação Lagoa do Jacaré. A Sequência 5, incompleta,

representa trato de sistema transgressivo com deposição dos argilitos e arenitos da Formação Três Marias.

		Litoestratigrafia		Estratigrafia de Sequências	
Grupo Bambuí Leste	Formação Três Marias		Arenito e Argilito	Sequência 5	TST
	Formação Serra da Saudade		Siltito, Argilito e Arenito	Sequência 4	RST MFS
	Formação Lagoa do Jacaré		Calcário cinza-escuro a preto, Folhelho e Margas	Sequência 3	RST
	Formação Serra de Santa Helena		Siltito, Argilito e Arenito		MFS TST
	Formação Sete Lagoas		Calcários e Dolomitos, Estromatólitos localizados	Sequência 2	RST MFS TST
	Formação Jequitáí		Diamictitos, Argilitos, e Arenitos	Sequência 1	RST
	Formação Carrancas		Conglomerados, Folhelhos, Arenitos e Dolomitos		MFS TST

Figura 7: Litoestratigrafia (Costa e Branco, 1961 e Dardenne, 1978) e estratigrafia de seqüências (Martins e Lemos, 2007) do Grupo Bambuí. (Modificado de Uhlein et al., 2017b). TST: Trato de Sistemas Transgressivo; RST: Trato de Sistemas Regressivo; MFS: Superfície de Inundação Máxima.

2.3 TRABALHOS ANTERIORES SOBRE ESTRATIGRAFIA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ

O trabalho de Martinez (2007) apresenta importante contribuição acerca do Grupo Bambuí no norte de Minas Gerais. O autor mapeou em escala 1:500.000 e apresentou aspectos estruturais e estratigráficos da unidade na região. Para a Formação Lagoa do Jacaré, foco do presente estudo, foram apresentadas pelo autor, na região de Lontra-MG, três litofácies que representam calcarenitos e calcissiltitos neomorfizados; calcários impuros; e

siltitos e calcissiltitos. Iglesias e Uhlein (2009) apresentam as mesmas litofácies, e apresentaram ainda estudo petrográfico detalhado das mesmas. De forma análoga, Reis (2013) trabalhou na região de Santa Maria da Vitória – BA e apresentou sete litofácies para a Formação Lagoa do Jacaré na região, detalhadas na tabela 3. Cita-se também o trabalho de Fragoso (2011), na região de Presidente Olegário-MG, que apresentou litofácies de calcissiltito, biolilito, marga e siltito, com estruturas de laminação e/ou estratificação plano-paralela e, localmente, laminação cruzada.

Tabela 3: Litofácies definidas por Reis (2013) na região de Santa Maria da Vitória-BA.

Litologia/fácies	Estruturas	Processos	Interpretação de ambiente
Calcários grosseiros (Cg)	Camadas tabulares, onduladas e sigmoidal, estratificação plano-paralela, cruzada planar, cruzada acanalada, cruzada tipo swaley.	Deposição por fluxos oscilatórios, relacionados à ação de ondas de tempestades em zona de shoreface.	Rampa intermediária
Calcários finos (Cf)	Camadas tabulares, onduladas, estrutura maciça, estratificação/laminação plano-paralela, cruzada planar, cruzada acanalada, cruzada tipo hummocky.	Deposição por fluxos oscilatórios, relacionados à ação de ondas de tempestade em zona de offshore.	
Calcarenitos muito finos siltosos (Cmf)	Camadas tabulares, laminação plano-paralela e cruzada de baixo ângulo.	Deposição por fluxos oscilatórios, relacionados à ação de ondas de tempestade em zona de foreshore, com aporte siliciclástico	
Calcarenitos finos e muito finos (Caf)	Camadas tabulares e onduladas, estrutura maciça, com laminação plano-paralela incipiente. Lentes com estratificação cruzada hummocky.	Transporte e deposição por tração, com baixa energia.	Transição rampa intermediária-rampa externa
Calcarenitos grossos (Cag)	Estratificação cruzada planar, cruzada acanalada e cruzada tipo swaley	Deposição por fluxos oscilatórios, relacionados a ação de ondas de tempestade em zona de offshore	
Calcirrutidos pretos (Crp)	Camadas lenticulares com estratificação cruzada planar e cruzada acanalada e cruzada tipo swaley	Deposição por fluxos oscilatórios, relacionados a ação de ondas de tempestades em zona de offshore.	
Calcisiltitos (Cs)	Camadas tabulares com laminação plano-paralela e cruzada (incipiente) ou estrutura maciça.	Transporte por suspensão e deposição por decantação.	

Destaca-se ainda o trabalho de Uhlein *et al.*, 2019 no qual os autores realizaram levantamentos quimioestratigráficos na Formação Lagoa do Jacaré na região do paleo-alto de Januária, e destacaram o padrão de alto enriquecimento isotópico da unidade. Os valores apresentados de $\delta^{13}\text{C}$ variaram em torno de +14.5‰ a +6.7‰, sugerindo deposição em uma bacia restrita com pouca ventilação oceânica. Os autores definem ainda para a unidade dois intervalos sedimentares distintos: uma sucessão composta essencialmente por carbonatos, e uma outra mista, composta de depósitos siliciclásticos carbonáticos.

2.4 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Almeida (1977) e Alkmim *et al.* (1993) definem que o Grupo Bambuí recobre o Cráton do São Francisco e apresenta deformação acentuada nas bordas da bacia, relacionada com a estruturação dos orógenos Araçuaí e Brasília adjacentes ao cráton. Diante disso, entende-se que o acervo estrutural relacionado ao Grupo Bambuí exibe maior expressão nas bordas da BSF.

Alkmim e Martins-Neto (2001) descrevem com propriedade as unidades da Bacia do São Francisco bem como apresentam sínteses evolutivas e arcabouço estrutural-estratigráfico da bacia, em especial relacionados ao Grupo Bambuí. Os autores definem os compartimentos estruturais leste e oeste da bacia, que sofreram influência da Faixa Araçuaí e da Faixa Brasília respectivamente, e um compartimento central, com camadas sub-horizontais a horizontais, que exibe pouca influência dos orógenos adjacentes ao cráton. Segundo os autores, o Compartimento Oeste representa um cinturão de cavalgamentos e dobramentos de antepaís, com vergência para leste, relacionado à faixa Brasília, e que exibe acervo estrutural com dobras em escalas diversas, bem como falhas de empurrão e transcorrentes. O Compartimento Leste é representado por um cinturão epidérmico de antepaís, vergente para oeste, relacionado à Faixa Araçuaí. Os autores descrevem ainda neste compartimento um descolamento basal regional que isolou do embasamento a deformação da cobertura bacinal, além de uma forte clivagem plano axial e intenso hidrotermalismo associado à deformação proximal ao orógeno.

Fragoso (2011) apresenta uma compilação do acervo estrutural da porção sul da Bacia do São Francisco, relacionada aos compartimentos estruturais anteriormente definidos por Alkmim e Martins-Neto (2001) (figura 8).

É importante também destacar o trabalho de Borges e Drews (2001) que realizaram levantamentos magnetométricos regionais no norte da bacia, de modo a mapear e destacar os lineamentos e feições magnéticas regionais bem

marcadas, e também possíveis anomalias estruturais como os altos de Pirapora e Januária.

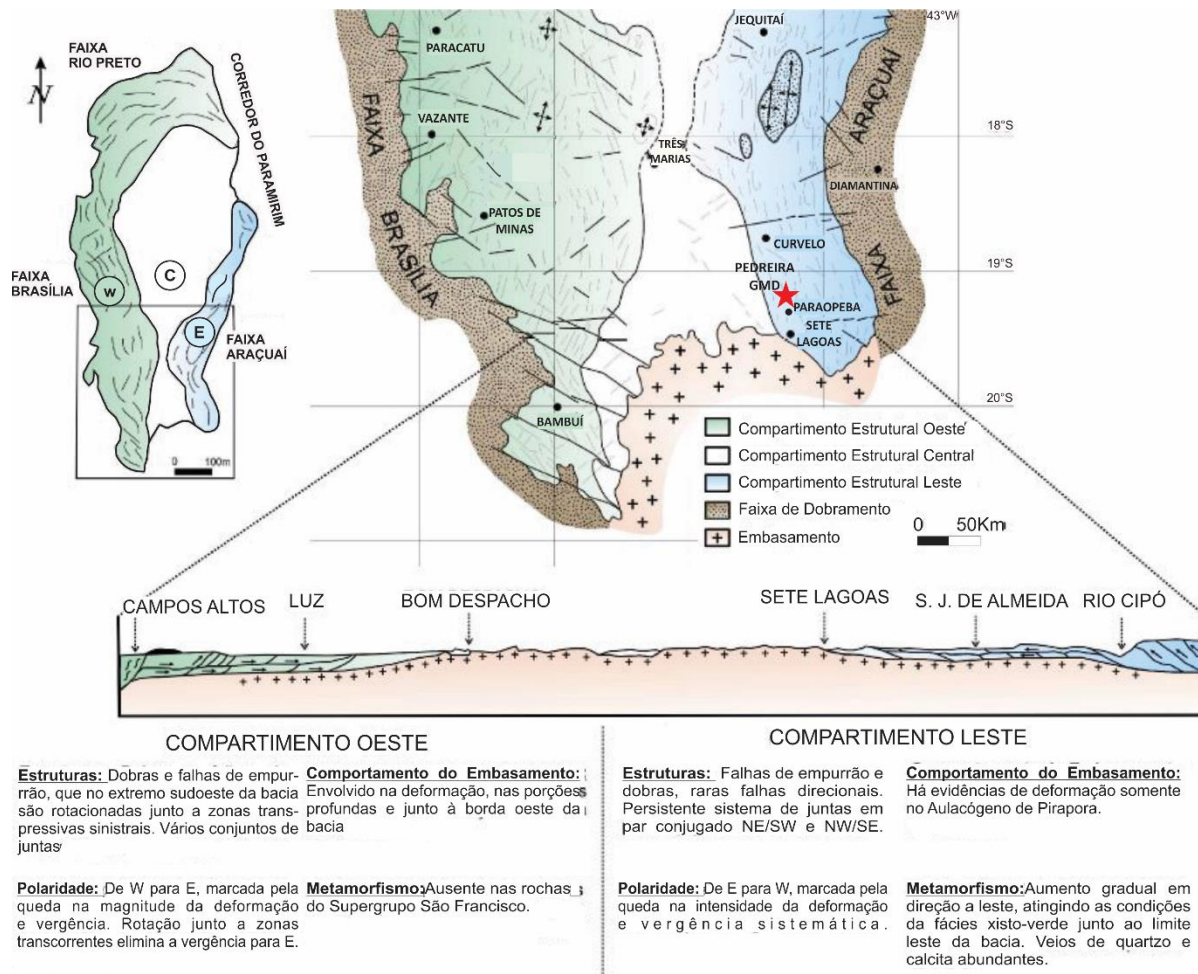


Figura 8: Compartimentação da Bacia do São Francisco e detalhamento do acervo estrutural relacionado ao Grupo Bambuí. (Modificado de Frago, 2011).

2.5 GEOCROLOGIA DO GRUPO BAMBUI

Dentre os estudos geocronológicos pioneiros nas rochas do Grupo Bambuí destacam-se os trabalhos de Parenti-Couto *et al.* (1981) que apresentaram idades Rb-Sr 640-590 Ma em metapelitos, e Bonhomme (1976) que apresentou isócronas Rb-Sr em torno de 619 ± 17 , também em metapelitos, na região de Januária. Posteriormente, Babinski e Kaufman (2003) e Babinski *et al.* (2007) dataram carbonatos da Formação Sete Lagoas pelo método Pb-Pb e encontraram idade de 740 ± 22 Ma, o que lhes permitiu correlacionar o Grupo Bambuí com os carbonatos da Formação *Maieberg* no cráton do Congo, bem

como relacionar os carbonatos de capa do Grupo Bambuí ao evento global Sturtiano (Halverson *et al.*, 2005).

A era do Neoproterozóico representou um momento de grande variação climática com grandes glaciações registradas em diversas litologias ao redor do planeta (Caxito *et al.*, 2012). Ocorreram muitas alternâncias entre climas quentes e glaciais bem marcadas na geologia global. Muitas teorias têm sido propostas de modo a se explicar essa associação de registros glaciais com rochas carbonáticas depositadas em climas mais quentes, como por exemplo a teoria do evento de glaciação global *Snowball Earth* (Hoffman *et al.*, 1998). No Grupo Bambuí essa associação é representada pelos sedimentos glaciogênicos da Formação Jequitaí sotoposta aos carbonatos de capa da base do Grupo Bambuí (Caxito *et al.*, 2012). A idade desse evento glacial, que marca o início da sedimentação na Bacia Bambuí, tem sido matéria de grande debate, sendo considerada Sturtiana (Babinski *et al.*, 2007, 2012; Vieira *et al.*, 2007) ou Marinoana (Caxito *et al.*, 2012; Alvarenga *et al.*, 2014).

Estudos mais recentes têm mostrado idades mais jovens para a Bacia Bambuí. Warren *et al.* (2014) descreveram, na sequência basal da Formação Sete Lagoas, a ocorrência do fóssil *Cloudina sp.*, que representa idades em torno de 550-542 Ma, trazendo assim mais possibilidades para o quebra-cabeças que representa a geocronologia do Grupo Bambuí. Datações U-Pb em zircões detríticos na mesma unidade, realizadas por Paula-Santos *et al.*, (2015) apresentaram uma idade máxima de deposição de cerca de 560 Ma.

É importante destacar ainda o trabalho de Moreira *et al.* (2020) que apresentou dados recentes de U-Pb de camadas tufáceas presentes em siltitos do topo da Fm. Serra da Saudade. Os resultados geocronológicos apontaram para idade de deposição desta unidade em torno de 520.2 ± 5.3 Ma, indicando um contexto de deposição cambriana.

Essa compilação de dados levantada permite concluir que possivelmente o Grupo Bambuí representa idade de deposição/diagênese variando entre o Período Ediacarano até os primeiros estágios do Cambriano, entre 630 a 520 Ma.

2.6 OCORRÊNCIAS DE GÁS NATURAL NA BACIA DO SÃO FRANCISCO

Gás natural é um composto formado por hidrocarbonetos leves da série parafínica, sendo o metano seu principal constituinte, podendo este estar associado a etano, propano, butano e pentano (Selley, 1998; Reis, 2018). Sua ocorrência pode ser de forma dissolvida em óleo (petróleo), em contato com o óleo formando capas gasosas, e na forma de hidrocarboneto dominante no reservatório. Sua gênese está predominantemente associada à degradação termoquímica de rochas geradoras ricas em matéria orgânica, porém pode apresentar origem biogênica, relacionada ao metabolismo de bactérias (Reis, 2018). O uso desse combustível fóssil está ligado à atividade industrial, principalmente, e também ao uso para geração de energia elétrica (termoelétricas).

Ocorrências de gás natural vem sendo descritas na bacia do São Francisco em Minas Gerais desde a década de 1960. Ao longo desse período diversos indícios foram documentados em poços profundos, poços tubulares de água e na forma de exsudações superficiais. O trabalho de Fujita e Clark-Filho (2001) descreve uma ocorrência na região de Alvorada do Norte-GO onde durante a perfuração de um poço tubular profundo, ao se atingir a profundidade de 92 m perfurados emanou gás à superfície, queimando a 10 m de altura. Os autores relatam ainda outras ocorrências em Remanso do Fogo, na confluência com o Rio Paracatu, em poços de água. O trabalho de Reis (2018) reúne importante acervo de ocorrências de exsudações de gás natural na BSF, compilado dos dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A pesquisa de hidrocarbonetos na BSF pode ser dividida em duas fases principais: uma entre as décadas de 1960 a 1980 e outra a partir de 2005 até o presente (Reis, 2018). Durante a primeira fase, a bacia foi alvo da perfuração de 22 poços profundos, além da aquisição de sísmica 3D, mais de 300.000 km² de levantamentos aerogeofísicos, bem como mapeamentos geológicos de superfície (Fugita e Clark-Filho, 2001). Na segunda etapa de exploração, após a quebra do monopólio do petróleo no Brasil, a bacia tornou-se alvo de novas campanhas que culminaram no levantamento de mais de 21.000 km de sísmica

2D, perfuração de 37 poços profundos e novos levantamentos aerogeofísicos (Reis, 2018). O autor reúne ainda acervo de ocorrências de gás natural associadas ao Bambuí no estado de Minas Gerais, relacionadas a poços profundos, poços tubulares de água e exsudações superficiais (figura 9).

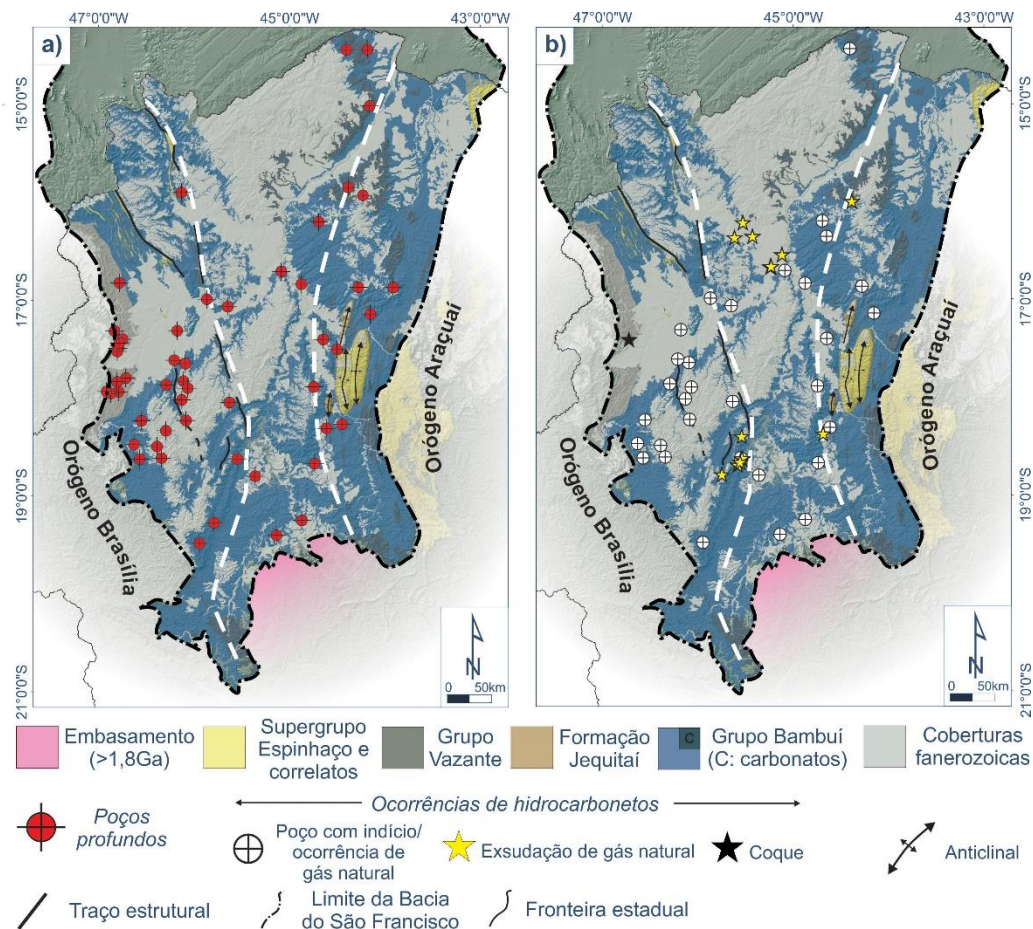


Figura 9: Dados de ocorrências de gás natural e coque na Bacia do São Francisco em Minas Gerais. (Extraído de Reis, 2018).

O principal potencial gerador de hidrocarbonetos relacionado ao Grupo Bambuí está localizado em sua base, e compreende a lamitos e lamitos-carbonáticos da Formação Sete Lagoas, ricos em matéria orgânica, e que exibem teores de COT (carbono orgânico total) da ordem de 3,5% (Reis e Alkmim, 2015; Reis e Suss, 2016). Na porção oeste da Bacia do São Francisco podem ocorrer altos teores de COT, em folhelhos negros e margas do Grupo Vazante (Martins-Neto, 2009), com teores médios entre 3-4% de COT, porém localmente podendo atingir 15,6%.

Os principais tipos de reservatórios na BSF estão associados ao Grupo Bambuí com rochas carbonáticas e siliciclásticas finas fraturadas e à Sequência

Paranoá-Espinhaço através de rochas areníticas arcoseanas e conglomeráticas (Fujita e Clark-Filho, 2001; Tonietto, 2010, Reis *et al.*, 2013). São em geral reservatórios que exibem porosidade primária baixa e porosidade secundária mais pronunciada. As rochas carbonáticas do Grupo Bambuí exibem porosidade secundária da ordem de 6-8%, de natureza vugular e intercristalina (Toledo *et al.*, 1998; Reis, 2018). Em se tratando as rochas da Sequência Paranoá-Espinhaço, a porosidade é da ordem de 10%, e está associada à dissolução de cimento e minerais do arcabouço. A evolução da bacia sugere história termal elevada, possivelmente 250 a 300°C, nas bordas da bacia, por conta da deformação relacionada aos orógenos circundantes, e temperaturas mais baixas no centro da bacia, onde predominam áreas pouco deformadas. Escassos são os estudos nesse sentido de avaliar a história termal da Bacia do São Francisco. Da mesma forma, a história de soterramento da bacia ainda é pouco conhecida, mas sugere soterramento severo (Reis, 2018). O autor pontua ainda a natureza não convencional do sistema petrolífero, uma vez que os reservatórios apresentam baixa porosidade e permeabilidade, as rochas geradoras apresentam-se em estágio supermaturo, além do contato água-hidrocarbonetos serem pouco evidentes ou inexistentes. Assim, muito provavelmente, os reservatórios seriam do tipo não convencional na BSF.

É importante também ressaltar que as trapas do sistema são dos tipos estratigráfico e estrutural. O trapeamento estratigráfico está relacionado ao afinamento de sucessões sedimentares meso a neoproterozóicas e as trapas estruturais relacionam-se com corredores deformacionais, do tipo falhas, dobramentos e cavalgamentos, associados à deformação dos orógenos adjacentes à bacia (Reis, 2018). As rochas selantes são representadas por pelitos e siliciclásticas finas não fraturas (Fujita e Clark-Filho, 2001).

CAPÍTULO 3: SÍNTESE SOBRE A METODOLOGIA CAMURES

3.1 O ESTUDO DE AFLORAMENTOS ANÁLOGOS

A caracterização de reservatórios é um processo inerente e fundamental a uma exploração de hidrocarbonetos de sucesso. Entende-se por reservatório o tipo litológico que apresente valores de porosidade e permeabilidade que permitam o armazenamento e transmissividade de fluidos pelos seus interstícios. Porosidade é definida como o percentual do volume de espaços vazios em relação ao volume total de rocha (Selley, 1998), e sua origem pode ser primária ou deposicional (sedimentar/cimentação) e secundária ou pós-deposicional (tectônica, química, etc) (Tabela 4). Choquette e Pray, 1970 apresentam uma classificação de 11 tipos de microporosidade em rochas carbonáticas (Figura 10). Essa classificação é amplamente utilizada para caracterização de porosidade em reservatórios carbonáticos de hidrocarbonetos.

Tabela 4: Classificação dos diferentes tipos de porosidade presentes em rochas sedimentares (Modificado de Selley, 1998).

Tempo de Formação	Tipo	Origem
Primária ou deposicional	Intergranular ou interpartícula Intragranular ou intrapartícula	Sedimentação
	Intercristalina Fenestral	Cimentação
Secundária ou Pós-deposicional	Vugular Móldica	Dissolução
	Fraturada	Tectônica, compactação, desidratação, diagênese

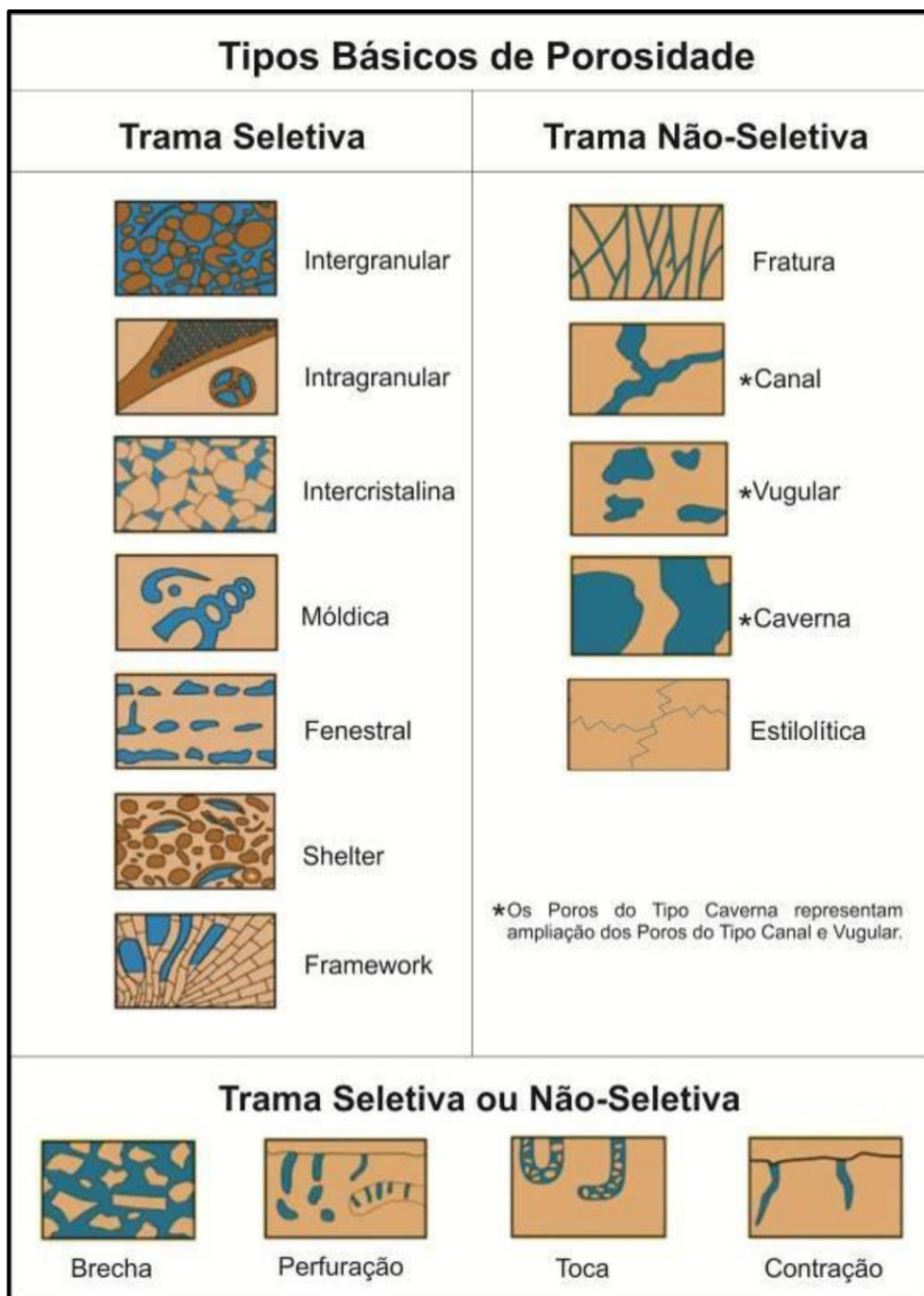


Figura 10: Tipos de microporosidade de rochas carbonáticas baseado em Choquette e Pray, 1970. (Extraído de Dantas, 2016).

A geração de modelos de reservatório de alta confiabilidade encontra dificuldades relacionadas principalmente à complexidade dos reservatórios em subsuperfície. Dados diretos de subsuperfície como sísmica, perfuração de poços e testemunhos, em geral não fornecem resultados completos, dado à sua limitada abrangência na amostragem dos corpos reservatório, definindo assim de maneira incompleta dados como geometria, heterogeneidades, extensão e arcabouço internos dos corpos sedimentares.

Nesse sentido, o estudo de análogos de reservatórios, para a indústria petrolífera, compreende uma importante ferramenta multidisciplinar, de baixo custo, que combina dados em diferentes escalas e permite reduzir incertezas nos processos exploratórios a partir da construção de modelos geológicos e preditivos. Os modelos geológicos de sistemas análogos permitem o reconhecimento de propriedades internas e externas importantes, como a identificação de heterogeneidades e de barreiras de permeabilidade e porosidade, nem sempre identificáveis em subsuperfície (De Luca e Basilici, 2008).

Paim *et al.* (2003) definem que as características finais dos depósitos sedimentares são influenciadas por diversos fatores que atuam desde a escala de bacia (gigaescala) e arquitetura estratigráfica (megaescala), passando pela escala de elementos arquiteturais (macroescala) e feições sedimentares (mesoescala), até chegar nas características texturais e petrofísicas do arcabouço, matriz e poros (Figura 11). Esses fatores estão relacionados a: 1) tectônica e ao clima que irão submeter regiões à erosão e deposição em bacias sedimentares e assim formar a arquitetura estratigráfica; 2) às dinâmicas dos sistemas deposicionais diversos que irão controlar as geometrias dos corpos sedimentares; e 3) aos atributos petrográficos físicos e composicionais que irão revelar a influência de eventos pós-deposicionais (diagenéticos) afetando os atributos anteriores.

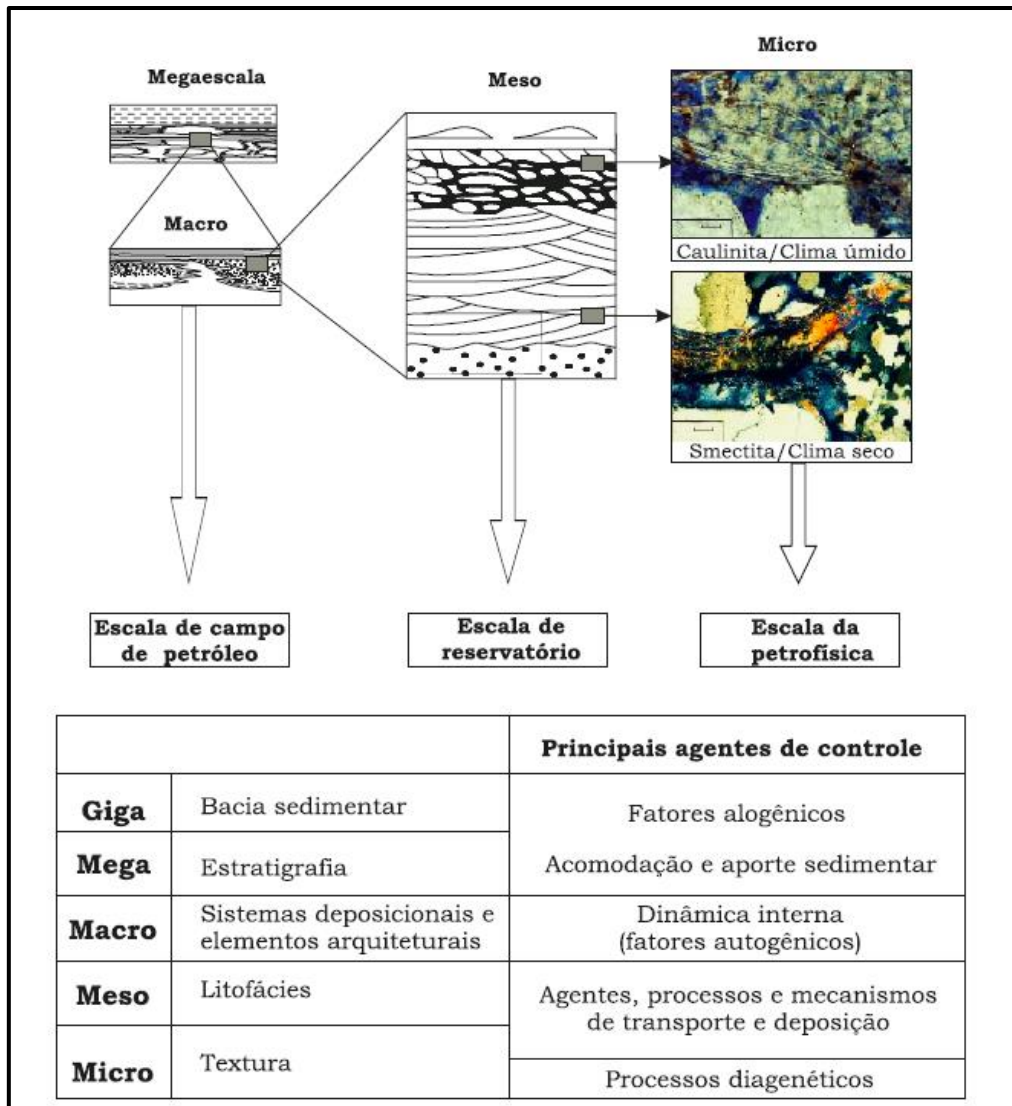


Figura 11: Hierarquia das heterogeneidades de depósitos sedimentares, tendo como premissa a observação em diferentes escalas. (Extraído de Paim et al., 2003).

O reconhecimento das heterogeneidades em todas essas escalas permite a modelagem geométrica dos reservatórios e posterior simulação de fluxo levando-se em consideração as características permo-porosas do reservatório a partir do afloramento análogo estudado. Dessa forma, busca-se conhecer melhor o reservatório alvo visando um maior volume de recuperação produzido nos campos de petróleo.

3.2 RESERVATÓRIOS CARBONÁTICOS DE HIDROCARBONETOS

Estima-se que mais de 30% das reservas de hidrocarbonetos espalhadas pelo planeta estão localizadas em reservatórios compostos de rochas carbonáticas dos mais diferentes tipos e, no Brasil especialmente, esse

percentual tende a aumentar com a descoberta de grandes campos de petróleo do chamado pré-sal, nos quais os reservatórios, em geral, representam rochas carbonáticas (Lima *et al.*, 2018). É importante ressaltar que reservatórios desse tipo apresentam alta complexidade em termos de permo-porosidade devido à grande combinação possível de processos deposicionais e diagenéticos (Azevedo *et al.*, 1987; Favoreto *et al.*, 2016).

Diante disso, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos de forma a ampliar os conhecimentos relativos aos diversos tipos de rochas carbonáticas reservatórias existentes de maneira a permitir a construção de modelos preditivos que reduzam incertezas relativas a esses importantes reservatórios de hidrocarbonetos. Esses trabalhos geralmente se concentram na caracterização faciológica, diagenética e petrofísica, além da integração de dados já conhecidos para a modelagem geológica e de fluxo dos sistemas análogos descritos (Guimaraes, 1994; Qi *et al.*, 2007; Koehrer *et al.*, 2010; Amour *et al.*, 2011; Forte *et al.*, 2012; Garcia *et al.*, 2015; Melani, 2015; Ferreira, 2016; Basso *et al.*, 2017; Lopes *et al.*, 2017; Barnaby e Ward, 2007; Lima *et al.*, 2018, Tomassetti *et al.*, 2018; entre outros).

No Brasil, trabalhos envolvendo caracterização de rochas carbonáticas dos mais variados tipos, além de modelagem geológica e de fluxo, vem sendo desenvolvidos em bacias produtoras (Campos, Santos e Sergipe-Alagoas). A Bacia de Campos apresenta reservatórios carbonáticos de alta densidade com coquinas associadas da Formação Coqueiros e depósitos dolomíticos/calcareníicos que representam sistema poroso complexo da Formação Quissamã (Winter *et al.*, 2007). Em se tratando da Bacia de Santos são descritos como reservatórios principais os carbonatos com coquinas e/ou microbialitos e estromatolíticos das Formações Barra Velha e Itapema, além de carbonatos oolíticos de águas rasas da Formação Guarujá (Moreira *et al.*, 2007; Fernandez e Santos, 2017). Campos Neto *et al.*, 2007 descrevem a Formação Morro do Chaves na Bacia de Sergipe-Alagoas como reservatório carbonático com boa porosidade relacionada a coquinas de bivalves.

3.3 A METODOLOGIA CAMURES

Estudos integrados para a caracterização físico-química de reservatórios representam uma atividade multidisciplinar que agrega dados provenientes de levantamentos sísmicos, perfilagem de poços, descrição e coleta de amostras de rochas, estudos petrológicos, análises petrofísicas e dados de produção, quando disponíveis (Garcia *et al.*, 2003). O produto dessa integração de dados define o arcabouço estrutural e estratigráfico da bacia, possibilita o mapeamento de intervalos produtores e o zoneamento do reservatório.

A metodologia de caracterização multiescalar de reservatórios (CAMURES) foca na representação da variação vertical e lateral de heterogeneidades e de arquiteturas deposicionais, permitindo a construção de modelos geológicos 3D preditivos de afloramentos análogos a reservatórios a partir de dados faciológicos, levantamento de perfis verticais e análises petrográficas e petrofísicas das zonas de interesse (Garcia *et al.*, 2003; Garcia *et al.*, 2015).

A metodologia busca ainda integrar dados em diferentes escalas de abordagem, transferindo e integrando informações relevantes desde microescala até escala de campo de petróleo ou de bacia. Permite-se entender, por exemplo, a depender dos objetivos, como as feições deposicionais em determinado afloramento análogo se refletem na estruturação das parasequências da bacia, e como isso poderia influenciar na qualidade do reservatório em subsuperfície. Essa análise integrada de análogos de reservatórios, em geral, segue a proposta metodológica descrita na figura 12.

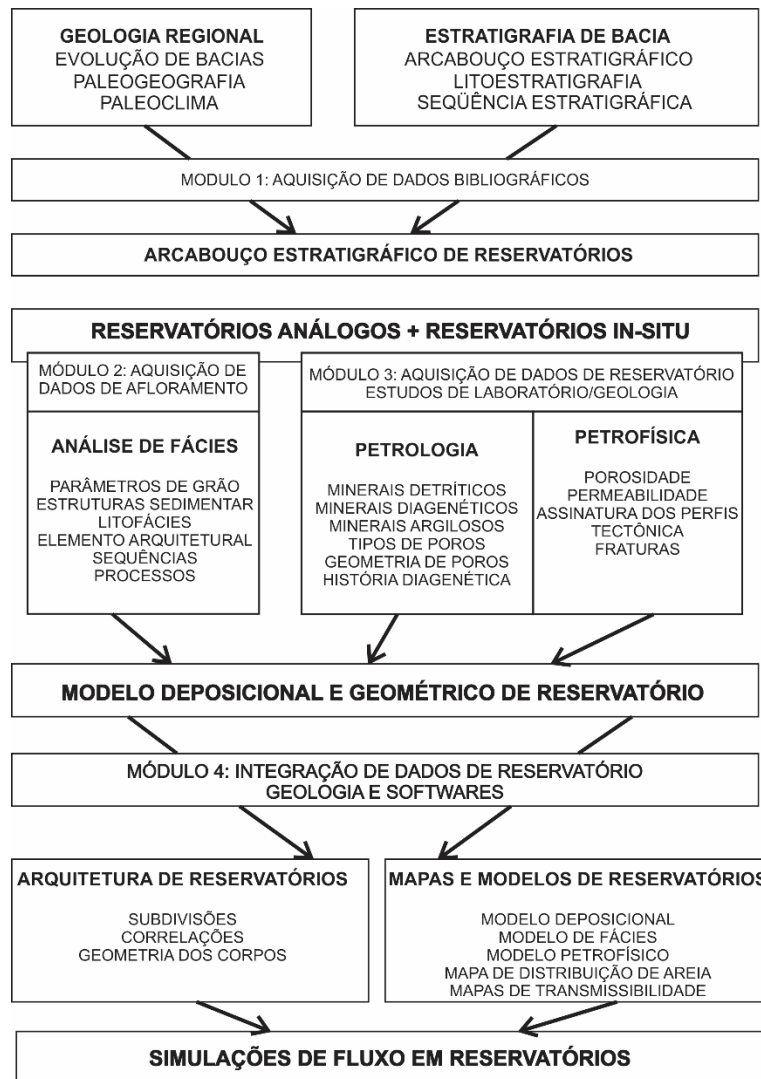


Figura 12: Proposta geral da metodologia CAMURES para modelagem de reservatórios análogos e in-situ. (modificado de Garcia et al., 2003).

Garcia et al. (2003) relatam que a análise integrada das heterogeneidades dos reservatórios constitui importante ferramenta para uma aproximação de conhecimentos de diferentes escalas. Os autores propõem ainda que as heterogeneidades compreendidas em reservatórios ocorrem em três intervalos de escalas de observação a saber:

- 1) Escala gigascópica a megascópica que compreende a escala de bacia, onde as heterogeneidades são controladas pelo arcabouço estratigráfico e estrutural, e seus atributos reconhecidos a partir dos registros de arquiteturas deposicionais.

- 2) Escala macroscópica a mesoscópica que envolve a escala de campo de petróleo, na qual as heterogeneidades são definidas a partir dos elementos arquiteturais, da faciologia e dos *trends* de permeabilidade, com forte controle do contexto deposicional. Nesta escala visa-se o reconhecimento das geometrias e variações internas dos corpos sedimentares reservatórios.
- 3) Escala microscópica que representa a escala de lâmina, na qual amostras representativas de intervalos promissores e de interesse são preparadas e analisadas de forma a permitir a identificação e quantificação da porosidade e permeabilidade petrofísica, a partir da petrologia e definição de modelos diagenéticos.

Após uma satisfatória caracterização do arcabouço, heterogeneidades e petrofísica dos análogos, segue-se para a etapa de integração desses dados para geração de modelos tridimensionais desses atributos. Entende-se por modelagem a aplicação de procedimentos matemáticos que visem a construção de modelos topográficos baseados na geometria e petrofísica dos corpos rochosos estudados e que possibilitem a criação de imagens facilitando a visualização dessas propriedades em perspectiva tridimensional (Félix *et al.*, 2015).

As definições do modelo geológico integradas com os dados de campo, e juntamente com a simulação de fluxo, representam uma das mais importantes fases no desenvolvimento e entendimento do reservatório. A partir da descrição tridimensional das suas heterogeneidades, seja em termos da geometria ou das propriedades petrofísicas, é possível representar consistentemente todos os dados e informações disponíveis do reservatório, que servirão como base para a tomada de decisões e previsões do desempenho de produção durante o gerenciamento do campo e para eventuais simulações de fluxo (Souza *et al.*, 2015).

CAPÍTULO 4: ARTIGO 1

Este capítulo contempla o artigo científico submetido à revista Geologia USP: Série Científica, e apresenta os resultados dos levantamentos executados nos trabalhos de campo. Neste trabalho são descritas as principais fácies definidas, análises petrográficas, bem como dados metodológicos dos processamentos geofísicos e resultados, além de definir o modelo deposicional para as rochas da pedreira GMD.

Os itens e figuras do artigo seguem a numeração geral do presente volume, e todas as referências bibliográficas relacionadas a este trabalho estão dispostas ao final deste capítulo, bem como juntamente com as demais no final deste volume.

Biblioteca da Submissão
Ver metadados

Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG

Alex Rodrigues de Freitas, Alexandre Uhlein, Márcio Vinícius Santana Dantas, Thal...

Submissão
Avaliação
Edição de Texto
Editoração

Arquivos da Submissão
Q Buscar

▶	<div style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px; display: flex; align-items: center;"> 376664-1 lecaorf, Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Para.docx </div>	Texto do artigo
▶	<div style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px; display: flex; align-items: center;"> 377557-1 publigr, 163573-para_aval.pdf </div>	Texto do artigo

[Baixar Todos os Arquivos](#)

[GEOUSP] Agradecimento pela submissão

De: Daniel Machado (portalderevistas@usp.br)

Para: lecaorf@yahoo.com.br

Data: domingo, 27 de outubro de 2019 20:28 BRT

Alex Rodrigues de Freitas,

Agradecemos a submissão do trabalho "Caracterização em Multiescala Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG" para a revista Geologia USP. Série Científica.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão: <http://www.revistas.usp.br/guspsc/authorDashboard/submission/163573>

Login: lecaorf

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Daniel Machado

Figura 13: Carta de submissão do artigo "Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG" à revista Geologia USP: Série Científica.

Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG

Multiscale characterization of Neoproterozoic carbonatic rocks in GMD quarry, Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, Paraopeba-MG

Caracterização multiescalar de carbonatos análogos

Alex Rodrigues de Freitas¹; Alexandre Uhlein¹; Márcio Vinícius Santana Dantas¹; Thaís Keuffer Mendonça¹.

1:Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Campus Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. (lecaorf@yahoo.com.br; auhlein@gmail.com; márcio_ufs08@hotmail.com; thaiskmendonca@gmail.com)

RESUMO

A metodologia CAMURES – Caracterização Multiescalar de Reservatórios vem se consolidando como uma importante ferramenta e que tem auxiliado na caracterização dos mais diferentes tipos de afloramentos análogos. O objetivo desse trabalho compreende a aplicação desta metodologia em um afloramento da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, representado por uma pedreira desativada na região de Paraopeba, centro-norte de Minas Gerais. Para tanto, foram utilizadas diferentes ferramentas investigativas em macro, meso e microescalas de análise para caracterização desta unidade neste afloramento. A caracterização litofaciológica de detalhe na pedreira revelou cinco litofácies carbonáticas principais. Dados geofísicos de GPR e *gamma ray* foram levantados para auxiliar no reconhecimento das principais geometrias e litologias presentes na área, bem como na correlação lateral dos perfis levantados na pedreira. A análise petrográfica mostra a ocorrência de seis microfácies. A análise das litofácies e estruturas sedimentares presentes apontam para deposição sob influência de ondas de tempestade em diversos ciclos tempestíticos em plataforma carbonática rasa. Essa sequência é definida na base por brechas intraclásticas, representando momentos de alta energia, passando a momentos de menor energia que favorecem a deposição carbonática fina com estratificações *hummocky* e plano-paralelas, marcas onduladas associadas, até momentos de calmaria com deposição de sedimentos carbonáticos finos e pelágicos em fundo de *shoreface*.

Palavras Chave: Carbonatos; Tempestitos; Afloramentos Análogos; Bacia do São Francisco; Reservatórios de Hidrocarbonetos.

ABSTRACT

CAMURES (Multiscale Reservoir Characterization) methodology shows up as an important tool of geological investigation and helps out in characterization of main types of reservoir analogues outcrops. This paper's goal is applying this methodology in a limestone outcrop of the *Lagoa do Jacaré* Formation, *Bambuí* Group, in a disabled quarry, in Paraopeba region, Minas Gerais state. Therefore, different types of investigative tools were used, in different scales of observation, for best describe this geological unit. A detailed lithofaciological description was made, and five individual lithofacies were defined. Ground Penetrating Radar and *gamma*-ray data were acquired in order to complement the knowledge about geometry and lithotypes in the study area, and also reveal information concern to lateral correlation between the geological profiles described. Petrographic analysis revealed presence of six microfacies associations. Facies correlation and analyze aim to a deposition under storm waves influence in many tempestitic cycles around shallow-marine carbonate platform. This sedimentological sequence is characterized by intraclastic breccias on the bottom, showing high energy moments of tempestite deposition, passing to lower wave-influenced energy, wich allowed deposition of fine to medium calcarenite with hummocky and planar stratification, and also ripple marks. The top of the complete tempestitic sequence is characterized by non-depositional moment of calm sea, that enable fine carbonate and pelagic sediment to lay over the shoreface floor.

Keywords: Carbonatic Rocks; Tempestites; Reservoirs analogues outcrops; São Francisco Basin; Hydrocarbon Reservoirs.

4.1 INTRODUÇÃO

Em bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos, o estudo dos reservatórios é de fundamental importância, pois permite entender não só o sistema petrolífero, como também permite planejar a melhor estratégia exploratória. Porém, como os reservatórios geralmente estão em grandes profundidades e seus estudos envolvem apenas abordagens indiretas (e.g. métodos geofísicos) e restritas (e.g. sondagem), o estabelecimento de modelos análogos se faz necessário (Paim *et al.*, 2003; Tatum e Franke, 2012; Rodrigues, 2018). Diante disso, estudos sobre afloramentos análogos vêm sendo amplamente utilizados para melhor entendimento, caracterização e avaliação de reservatórios, e conseqüente minimização de riscos e problemas durante a produção de hidrocarbonetos.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos em afloramentos análogos no sentido de mapear as heterogeneidades e diversos elementos arquiteturais e diagenéticos que permitam compreender os atributos permo-porosos e assim promover um melhor entendimento acerca dos reservatórios em subsuperfície (Paim *et al.*, 2003; Lira, 2004; Menezes, 2004; Koehrer *et al.*, 2010; Forte e Pipan, 2011; Forte *et al.*, 2012; Tatum & Francke, 2012; Garcia *et al.*, 2015; Melani, 2015; Hilbert, 2016; Basso *et al.*, 2017; Rodrigues, 2018).

O presente trabalho representa a aplicação da técnica de Caracterização Multiescalar de Reservatórios – CAMURES (Garcia *et al.*, 2015), aplicada aos carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí. A metodologia CAMURES utiliza dados levantados em afloramentos análogos de reservatórios em macro, meso e microescalas, e foca no mapeamento de elementos arquiteturais e de variações de heterogeneidades verticais e laterais de forma a permitir a definição de modelos geológicos e preditivos.

Portanto, pretende-se apresentar neste artigo os resultados obtidos em levantamentos de perfis litofaciológicos, análise de microfácies presentes na unidade através de petrografia microscópica e análise de MEV, bem como dados de GPR e raios gama, além de análise de tectônica rúptil, visando caracterizar o potencial dessas rochas como reservatórios de hidrocarbonetos gasosos. Os trabalhos foram desenvolvidos em uma pedreira desativada no município de

Brasília e Araçuaí (Zalán e Romeiro-Silva, 2007). Constitui segundo Alkmim *et al.*, (1993) a principal unidade neoproterozoica de cobertura do Cráton do São Francisco. As rochas do Grupo Bambuí representam ciclos transgressivo-regressivos em uma bacia *foreland*, na transição entre o cráton e a faixa móvel Brasília, em decorrência da sobrecarga gerada pela edificação de tal orógeno (Alkmim e Martins-Neto, 2001; 2012; Uhlein *et al.*, 2017).

Alkmim e Martins-Neto (2001) subdividem a Bacia Bambuí em três compartimentos estruturais: oeste, cujas rochas apresentam influência tectônica da Faixa Brasília, leste com influência tectônica da Faixa Araçuaí e zona central com camadas subhorizontalizadas que apresentam pouca influência das faixas móveis.

Dardenne (1978) definiu seis formações para o Grupo Bambuí, da base para o topo: Formação Jequitaiá, formada predominantemente por diamictitos, raros arenitos e ritmitos; Formação Sete Lagoas, composta por uma sucessão de dolomitos e calcários; Formação Serra de Santa Helena, que apresenta folhelhos e siltitos com lentes de calcários; Formação Lagoa do Jacaré, com alternância entre calcários escuros, por vezes oolíticos, e siltitos e margas; Formação Serra da Saudade, que compreende folhelhos, arenitos e argilitos esverdeados; e finalmente a Formação Três Marias, de topo, que apresenta arenitos arcoseanos e siltitos (figura 5).

et al. (2015) realizaram datações U-Pb em zircões detríticos na mesma unidade e apresentaram uma idade máxima de deposição de cerca de 560 Ma.

Em relação às fácies da Formação Lagoa do Jacaré, o trabalho de Martinez (2007) definiu 3 litofácies para a unidade na região de Lontra, norte do estado de Minas Gerais: 1) Calcarenitos e Calcissiltitos neomorfizados; 2) Calcários impuros e 3) Siltitos e Calcissiltitos. Reis (2013) define e caracteriza ainda sete litofácies para a unidade na região de Santa Maria da Vitória – BA: 1) Calcarenitos pretos grosseiros; 2) Calcários pretos finos; 3) Calcarenitos muito finos e siltosos; 4) Calcarenitos finos a muito finos maciços; 5) Calcarenitos grossos, tabulares; 6) Calciruditos pretos com estratificações cruzadas e 7) Calcisiltitos.

Ocorrências de hidrocarbonetos gasosos têm sido descritas na Bacia Intracratônica do São Francisco, principalmente no norte/noroeste de Minas Gerais (Fujita e Clark-Filho, 2001; Pinto *et al.*, 2001; Martins-Neto, 2009; Reis, 2018), e esse acervo de ocorrências está associado exclusivamente a coberturas sedimentares proterozóicas (Reis, 2018). Reis e Alkmim (2015) relatam que, na Sequência Bambuí, o potencial gerador se encontra principalmente nos lamitos carbonáticos da Formação Sete Lagoas. Os principais reservatórios na Sequência Bambuí se encontram nos carbonatos ediacaranos (Fm. Sete Lagoas e Fm. Lagoa do Jacaré), e nos metapelitos fraturados (Fujita e Clark-Filho, 2001; Tonietto, 2010). Reis (2018) afirma ainda que o sistema petrolífero representa um sistema não-convencional, levando-se em consideração a natureza pouco porosa dos reservatórios, bem como o estágio supermaturo das rochas geradoras.

4.3 MÉTODOS

A metodologia de caracterização multiescalar de reservatórios (CAMURES), utilizada neste trabalho, envolve aplicação de métodos indiretos e diretos de investigação e descrição do afloramento, em diferentes escalas, para mapeamento de atributos permoporosos, elementos arquiteturais e heterogeneidades da Formação Lagoa do Jacaré, aflorante na pedreira.

Dentre os métodos investigativos aplicados são citados:

- 1) O mapeamento sistemático do afloramento alvo, utilizando-se das técnicas de análise estratigráfica e litofaciológica que envolveu levantamento de 4 perfis colunares de detalhe, bem como subdivisão e sucessões de fácies. Para descrever e amostrar diretamente o afloramento foram utilizadas técnicas de rapel para acesso às rochas. Quatro perfis colunares foram levantados, distribuídos lateralmente na pedreira. O paredão descrito tem cerca de 12 metros de altura e aproximadamente 150 m de extensão. Acima deste paredão ocorre um platô com cerca de 9 m de largura.
- 2) Aplicação de GPR (*Ground Penetrating Radar*) no afloramento para imageamento raso, com objetivo de auxiliar na interpretação da geometria e arquitetura deposicionais. Foram levantadas 3 linhas tanto no chão da pedreira, quanto na porção superior dos paredões utilizando-se antenas com 160 Mhz de frequência modelo SIR-2000 GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc.*), em modo *common-offset*. A etapa de processamento das linhas brutas obtidas em campo foi realizada utilizando-se o *software ReflexW* versão 5.0. Esta etapa é realizada em escritório e objetiva a redução de sinais indesejados ou ruídos, além de realçar as principais feições observadas nos radargramas. Os procedimentos adotados nesta etapa envolvem aplicação de ganho inicial para realce de todas as linhas dos radargramas, seguido de remoção de ganho durante a aquisição (*Header Gain Removal*), ajuste de tempo zero, remoção de *background*, aplicação de filtro passa-banda, e conversão de tempo em profundidade (*time-depth conversion*) que converte os tempos duplos em profundidade;
- 3) Gamaespectrometria para correlação dos perfis colunares confeccionados e identificação de possíveis frações argilosas associadas. A gamaespectrometria mede as contagens/concentrações de CT, K, eU e eTh em rochas, sedimentos e solos através da detecção dos raios gama emitidos durante o decaimento radioativo natural destes elementos (Ferreira *et al.*, 2010). Ulbricht *et al.* 2009 apresentam uma visão geral das características e comportamento geoquímico desses elementos. Segundo os autores o K presente em rochas carbonáticas é relativamente

baixo se comparado a rochas graníticas félsicas, porém pode ocorrer concentração por processo de ilitização em bacias sedimentares marinhas e continentais, além de minerais secundários como micas e argilas. Ainda segundo os autores, as principais concentrações dos elementos Th e U em calcários advém de minerais secundários como apatitas. Durante o levantamento foi utilizado aparelho gamaespectrômetro portátil RS-230 da marca *Radiation Solutions*, e os dados de contagem total foram expressos em °API.

- 4) Descrições petrográficas em macro e microescalas para definição das características da rocha em estudo, análise das relações matriz/cimento e granulometria. Foram confeccionadas 35 lâminas petrográficas. Nas descrições das fácies carbonáticas, foi levada em consideração a classificação proposta por Dunham (1962). Os trabalhos envolveram descrição de amostras, confecção de lâminas petrográficas e preparação (polimento e metalização) de lâminas e pequenos fragmentos de amostras para análises em MEV (microscópio eletrônico de varredura). O funcionamento do MEV consiste essencialmente em um fino feixe de elétrons que bombardeia a amostra e captura a resposta (radiação) emitida por ela (elétrons secundários, raios-x, elétrons retroespalhados, catodoluminescência) (Reed, 2005). O feixe corre por toda a lâmina ou amostra devidamente preparada (polida e metalizada), e capta as respostas emitidas que irão marcar principalmente as variações composicionais e de relevo da rocha. Pode-se ainda acoplar o EDS (Espectrômetro por energia dispersiva) ao MEV, o que permite realizar um mapeamento e análise dos principais elementos químicos que compõem a rocha estudada. A integração desses dados petrográficos auxiliou na interpretação dos parâmetros petrofísicos (porosidade e permeabilidade) da rocha.

4.4 RESULTADOS

4.4.1- Associação de Fácies

A Formação Lagoa do Jacaré é descrita na pedreira GMD como uma sucessão de rochas carbonáticas com presença de raras camadas siltíticas intercaladas, sendo descritas para a unidade 5 litofácies (Tabela 1). No afloramento estão presentes calcarenitos finos a médios, cinza escuros, por vezes maciços, ou apresentando estruturas sedimentares como estratificações plano-paralelas centimétricas a decimétricas, estratificação ondulada, estratificação do tipo *hummocky*, camadas lenticulares amalgamadas, brechas com presença de intraclastos calcilutíticos, sub-arredondados a angulosos, cinza claros, calcarenitos finos com marcas onduladas assimétricas com comprimentos de onda centimétricos, e estratificações onduladas, fora de fase, com truncamentos de baixo ângulo.

As litofácies mais grosseiras (brechas) são representativas de momentos de maior energia de tempestades, nos quais ocorre erosão do substrato com formação de marcas de solas e suspensão de material mais fino, e posterior deposição de intraclastos (figura 6-E) em matriz calcarenítica. Em seguida, a redução da energia da tempestade gera correntes de menor intensidade que favorecem a formação de estratificações paralelas, ripples simétricas e assimétricas (figura 6-D) e *hummockys* (figura 6-C). No estágio final do evento tempestítico, quando já não existe influência de tempestades na deposição dos sedimentos, uma camada de material fino (pelitos e sedimento calcilutítico) decanta (figura 6-B), encerrando a sequência, até que um novo ciclo tempestítico se inicie.

Dados de paleocorrentes foram levantados na pedreira a partir da exposição de estruturas de marcas onduladas assimétricas, e mostraram uma direção predominante NW-SE (entre 290° e 320°; e entre 110° e 140°).

Tabela 1: Tabela das litofácies descritas na pedreira GMD, Fm. Lagoa do Jacaré.

Fácies	Descrição	Interpretação
Calcarenitos médios a finos maciços (Cmm)	Calcarenitos cinza escuros, reage ao HCl, maciço, e localmente com calcitas recristalizadas pretas, e estratificação gradacional.	Deposição por processos trativos, com fluxo unidirecional.
Brecha intraclástica (Bi)	Rocha com presença de intraclastos calcilutíticos alongados, matriz calcarenítica fina, com clastos subarredondados a angulosos, com dimensões que variam de centímetros a poucos decímetros, predominantemente orientados, de coloração cinza claro. Brechas lenticulares que gradam a calcarenitos.	Início de ciclo tempestítico com alta energia de tempestade. Ambiente de rampa carbonática de <i>shoreface</i> . Representa a base do ciclo tempestítico.
Calcarenitos finos com marcas onduladas assimétricas (Cfo)	Calcarenitos finos, cinza escuros, com laminação plano-paralela milimétrica a centimétrica, apresentando variação na coloração das lâminas, reagente a solução diluída de HCl, por vezes marcada no topo por <i>ripple marks</i> assimétricas com comprimentos de onda da ordem de 2 cm, com inferência de paleocorrentes de direção NW-SE.	Deposição de material por correntes induzidas à medida que a energia de tempestade diminui, favorecendo a deposição de laminação plano-paralela e marcas onduladas. Transição <i>shoreface-offshore</i> .
Calcarenitos médios com estratificação hummocky (Cmh)	Calcarenito médio, cinza escuro, com presença de estratificação cruzada do tipo <i>hummocky</i> , e presença constante de marcas onduladas simétricas e assimétricas com comprimentos de onda centimétrico.	Fácies tempestítica típica, depositada em rampa carbonática (<i>shoreface</i>).
Calcilutitos e siltitos (Clu)	Calcilutitos, cinza claros, geralmente com aspecto maciço, eventualmente laminados; siltitos laminados	Momento de calmaria com decantação carbonática/siliciclástica fina.

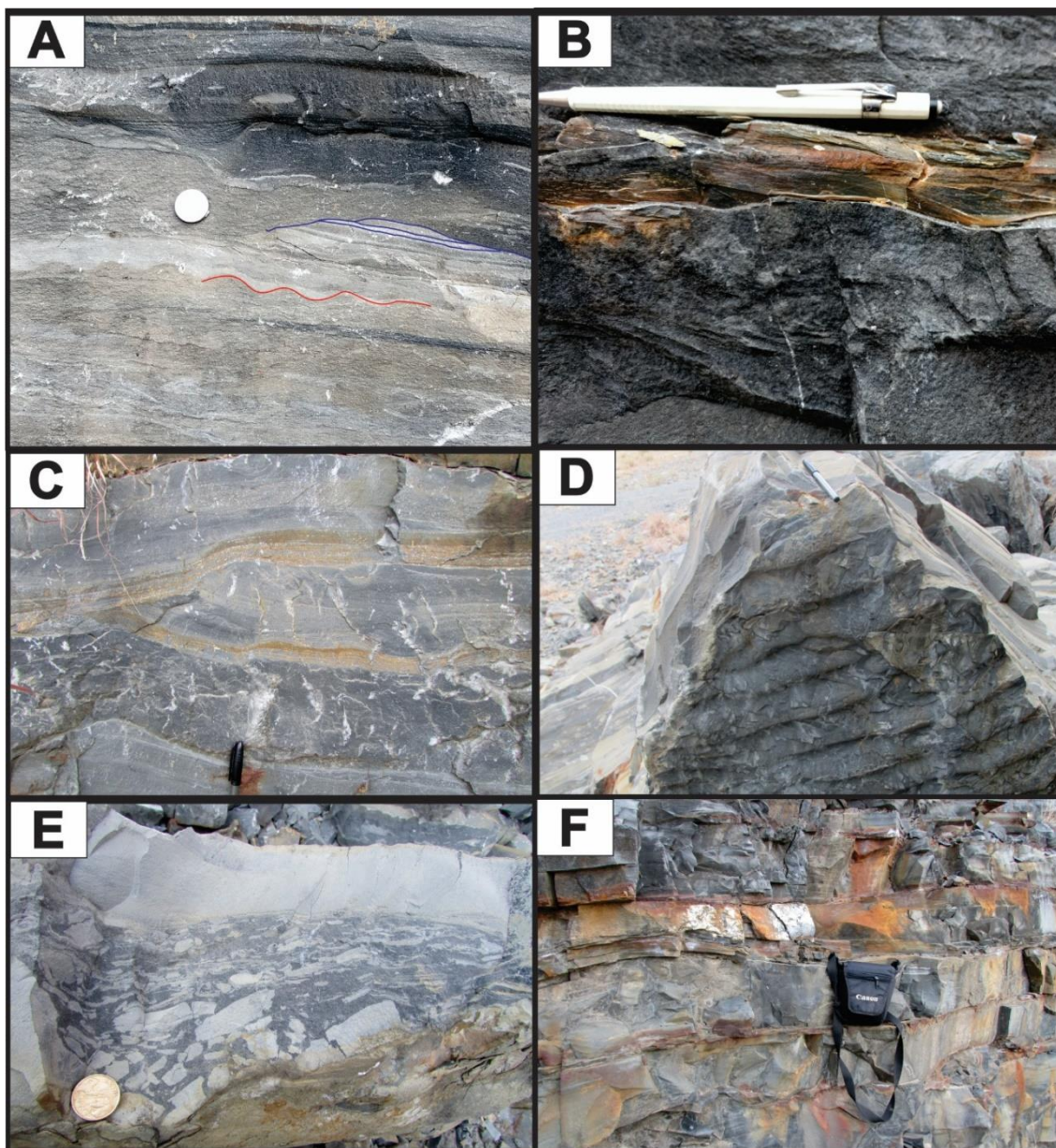


Figura 16: Principais litofácies e estruturas presentes na pedreira GMD: A) Calcarenito laminado com presença de marcas onduladas, laminações truncadas, e plano-paralelas; B) Detalhe de fina camada de siltito entre calcarenitos; C) Parte de uma estratificação cruzada por influência de ondas (hummocky). D) Detalhe de marcas onduladas assimétricas em calcarenito. E) Brecha intraclástica maciça, com geometria lenticular, gradando a calcarenito com intraclastos . F) Disposição de camadas onduladas e amalgamadas.

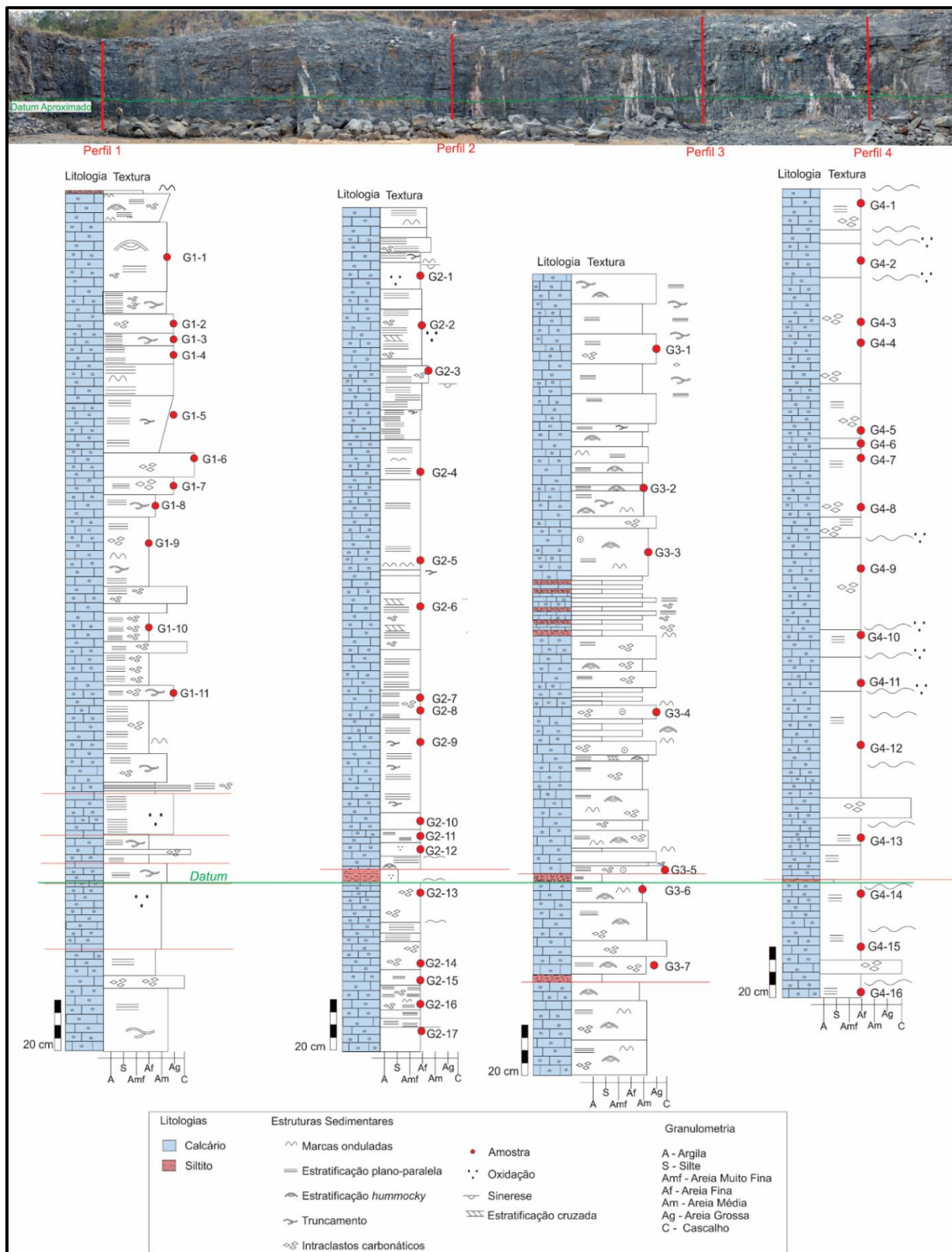


Figura 17: Fotomosaico representativo da pedra GMD com a representação dos perfis sedimentares levantados. O datum é representado por uma camada de siltito bem identificada em todos os perfis laterais.

4.4.2- Petrografia

Foram observadas predominantemente rochas calcárias, como calcarenitos finos a médios, por vezes com presença de micas e quartzo associados, intercalações de calcilutitos, seja em laminações, ou em intraclastos calcilutíticos ou pelíticos associados, além de calcitas espáticas res cristalizadas. Ocorrem ainda porções ooidais com os grãos carbonáticos dispersos em matriz/cimento finos. São presentes pequenas venulações, cortando, geralmente, calcilutitos com matriz fina, além de porções com minerais opacos orientados em finas laminações. Alinhamentos irregulares contendo opacos, geralmente formados a partir de dissolução, aparecem, formando estilólitos.

A partir das descrições petrográficas foram caracterizadas 6 microfácies para as amostras coletadas:

1) Grainstones ooidais intraclásticos, geralmente laminados. Esta, representa a fácies petrográfica mais observada nas lâminas petrográficas. Os oóides apresentam-se em grãos arredondados a subarredondados, de tamanho areia média, e por vezes pôde ser observada a estrutura interna concêntrica característica desses grãos carbonáticos. Entretanto o intenso processo de recristalização dessas rochas pode mascarar essas estruturas internas dos oóides (figura 8-B). Os núcleos são formados por calcita espática em geral. Os intraclastos são sub-arredondados a agulosos, e geralmente são formados por material calcilutítico ou pelítico, podendo apresentar piritas disseminadas (Figura 8-B). Foi observado ainda, em algumas lâminas, injeção de calcita grosseira em forma de veios. Podem ocorrer estilólitos dispersos pelas lâminas (figura 8-A). O cimento (figura 8-B) em geral apresenta cristais calcíticos bem formados e padrão blocoso (Tonietto, 2010). Ocorrem ainda teores variáveis de minerais silicáticos (5% a 10%), especialmente quartzo e micas brancas, além de considerável teor (até 10%) de minerais opacos dispersos por todas as lâminas. Foram descritas 12 lâminas nessa microfácies

2) *Grainstones* intraclásticos, geralmente laminados. Os intraclastos apresentam-se subarredondados (figura 8-C e 8-D) a subangulosos, compostos principalmente de material pelítico, podendo ocorrer piritas disseminadas. A proporção de cimento fica entre 50 e 70% e a de intraclastos pelíticos entre 20 e

30%, podendo ocorrer ainda grãos de quartzo dispersos (entre 5 e 15%), micas brancas (5 a 10%), e opacos (5 a 10%). Ocorrem ainda estilólitos dispersos pelas lâminas, além de veios com calcita espática recristalizada. O cimento apresenta padrão blocoso de disposição dos minerais. Foram descritas 9 lâminas nessa microfácies.

3) *Grainstones* recristalizados, geralmente formados somente por cimento recristalizado (60% a 75%), com cristais calcíticos de tamanhos variados (desde areia fina a silte), sem presença de oóides ou intraclastos, podendo ocorrer teores de material siliclástico, principalmente quartzo (até 15%) e micas (até 10%), além de minerais opacos (até 10%) dispersos ou em veios estilolíticos nas lâminas. Foram descritas 3 lâminas com essas características.

4) *Wackestones* intraclásticos, geralmente laminados. Apresentam teores consideráveis de material silicoso, além de intraclastos calcilutíticos. Essas rochas são compostas principalmente por matriz micrítica (entre 50% e 70%), grãos de quartzo subangulosos (10 a 20%) e opacos (5 a 10%), podendo ocorrer ainda intraclastos pelíticos piritizados associados (até 10%), além de micas (até 5%). Foram descritas 3 lâminas nessa microfácies.

5) *Mudstone* laminado, com matriz micrítica fina predominante (75 a 85%), com grãos tamanho argila a silte, contendo baixo teor de quartzo, micas e opacos (até 15%). Podem ocorrer, em algumas porções, lentes, veios ou injeções de calcita grosseira cortando as laminações presentes (figura 8-E). Foram descritas duas lâminas com essas características.

6) Siltito laminado, de granulometria silte médio a grosseiro, geralmente contendo altos teores de quartzo subanguloso (60% a 85%). Ocorre ainda, entre as laminações, matriz carbonática fina (10 a 15%), sericitas e argilas (até 5%), além de minerais opacos dispersos ou aglomerados em laminações por toda a rocha (5 a 10%). As micas observadas podem aparecer dispersas ou orientadas. Em algumas amostras há alternância entre lâminas carbonáticas finas e lâminas silicosas, sendo essas amostras denominadas siltitos carbonáticos. Foram descritas 6 lâminas pertencentes a essa microfácies (figura 8-F).

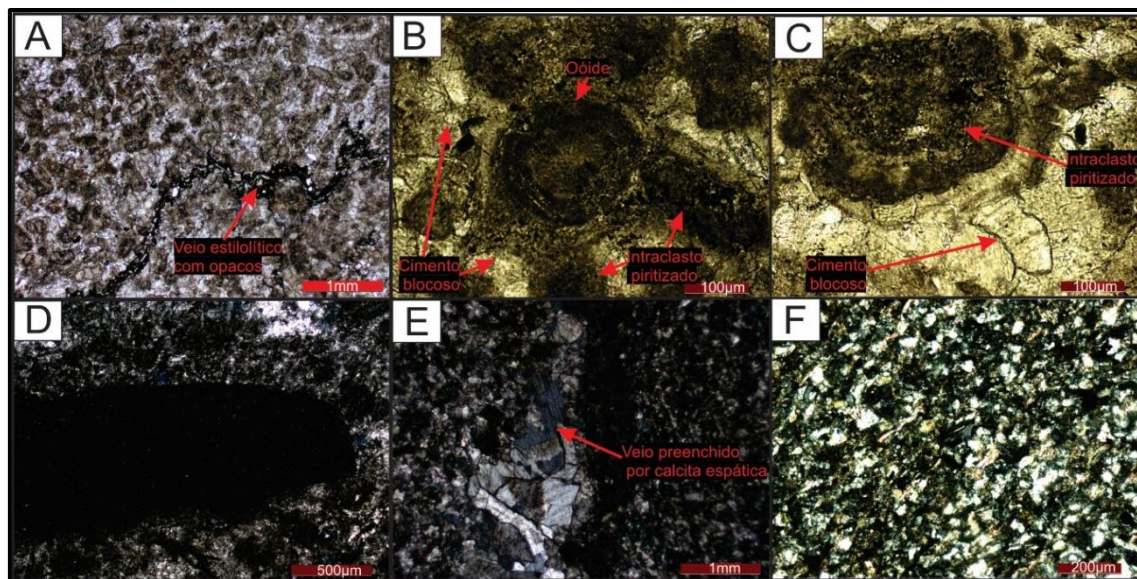


Figura 18: Fotos das principais microfácies. **A)** Grainstone ooidal intraclástico (polarizadores paralelos) com detalhe para veio estilolítico; **B)** Detalhes de cimento blocoso, oóides concêntricos bem preservados e intraclastos subarredondados. (polarizadores paralelos); **C)** Grainstone intraclástico com intraclastos subarredondados piritizados. Detalhe de cimento blocoso. (polarizadores paralelos); **D)** Grainstone intraclástico, com detalhe de intraclasto piritizado. (polarizadores cruzados); **E)** Mudstone com detalhe para veio preenchido por calcita espática (polarizadores cruzados); **F)** Siltito com matriz carbonática. (polarizadores cruzados)

Os trabalhos de petrografia envolveram ainda análises por microscópio eletrônico de varredura (MEV) para verificação de existência de microporosidade na rocha, bem como análise das relações entre matriz/cimento e grãos carbonáticos. Uma lâmina e uma amostra foram investigadas para melhor entender as relações entre grãos carbonáticos e cimento, assim como para caracterizar microporosidade.

A lâmina polida e metalizada revelou a existência de microporosidade na rocha, formada principalmente por microfraturas (figuras 9-A e 9-B), que ocorrem por vezes alinhadas, porém sem interconectividade entre as mesmas. A amostra evidenciou a presença maciça de cristais calcíticos, envolvendo grãos carbonáticos ooidais e peloidais (figuras 9-C), e presença de porosidade intergranular (figura 9-D). A porosidade está relacionada também a possíveis arrancamentos de grãos do arcabouço cristalino (figura 9-B), também sem apresentar interconectividade entre os poros.

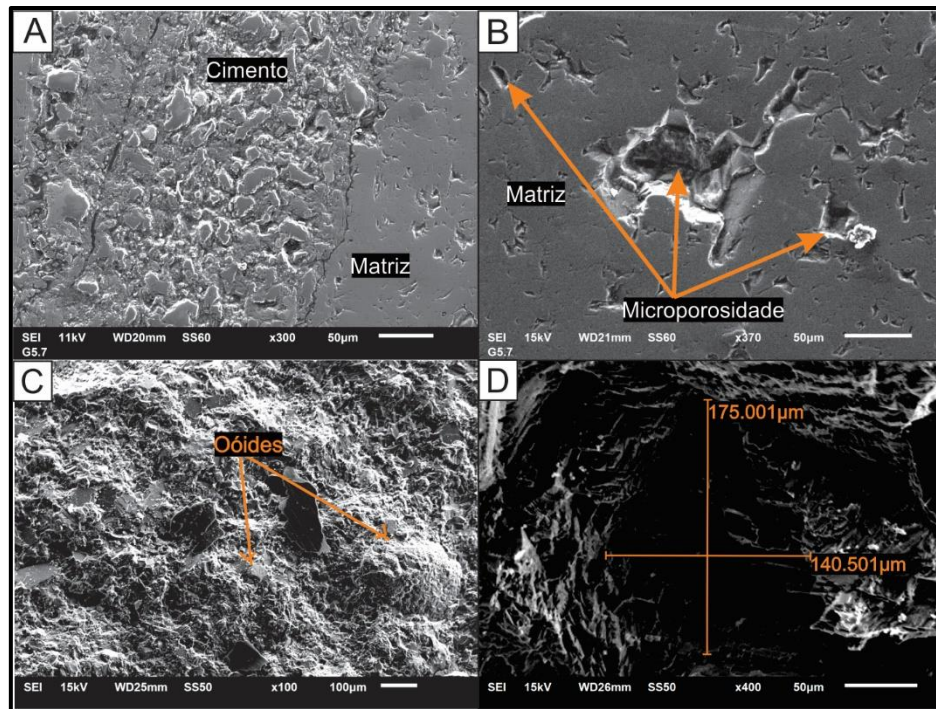


Figura 19: Imageamento através de MEV. A) Microfraturamento marcado em porção com matriz micrítica com pequenos poros dispersos pela lâmina, e presença de cimento espático recristalizado; B) Microporosidade representada por fraturamentos na matriz e possíveis arrancamentos de grãos do substrato. C) Amostra marcando grãos bem formados de calcita, envolvendo oóides; D) Detalhe de poro intergranular.

4.4.3 – Radar de Penetração no Solo – GPR (*Gound Penetrating Radar*)

A análise dos radargramas processados revelou as feições arquiteturais e deposicionais da Formação Lagoa do Jacaré na pedreira. As linhas 1 e 3 foram levantadas no chão da pedreira, e a linha 2 na bancada superior (figura 10). As antenas utilizadas permitiram investigar cerca de 17 metros de profundidade sendo que as principais estruturas marcadas nos radargramas aparecem com boa resolução até cerca de 10 metros de profundidade.

As principais geometrias deposicionais observadas nos radargramas são subparalela, sigmoidal, *hummocky*, lenticular e divergente (figura 11). O padrão subparalelo representa aporte estável e taxa de subsidência uniforme, podendo ser representativo de momentos agradacionais, com aumento de espaço de acomodação por conta da inclinação suave da rampa (shoreface) e aporte estável. O padrão divergente pode representar uma variação lateral da taxa de sedimentação. As feições sigmoidais indicam deposição em superfície inclinada

(talude/shoreface/rampa carbonática) e sugerem nos radargramas levantados uma direção de progradação para SE. A configuração *hummocky* apresenta refletores descontínuos com padrão segmentado e indicam que durante deposição ocorreu influência de ondas de tempestades.



Figura 20: Imagem aérea de localização das linhas de GPR levantadas na pedreira. Fonte: Google Earth.

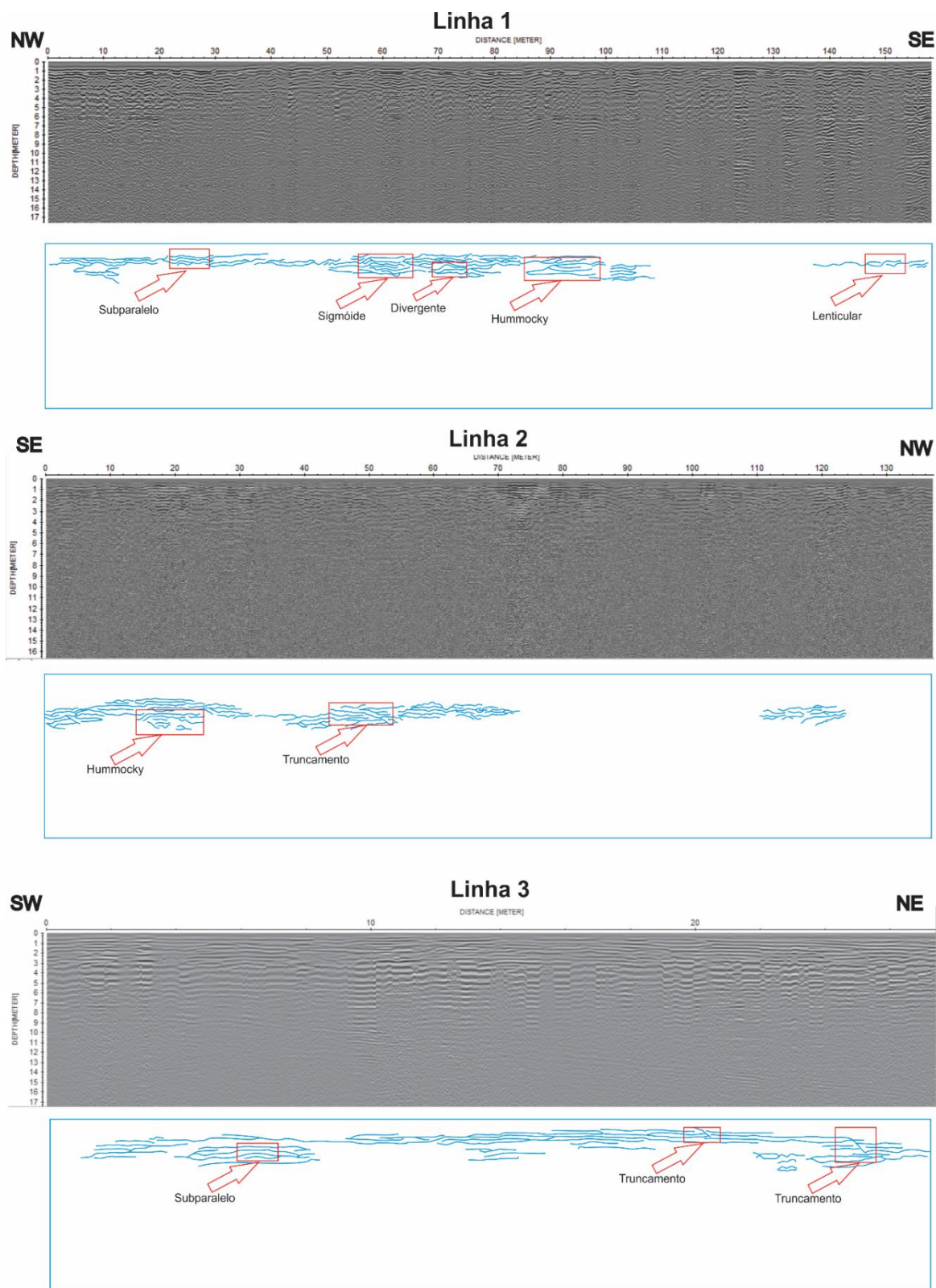


Figura 21: Linhas 1, 2 e 3 processadas e interpretadas. Dentre as geometrias internas marcadas pelos estratos destacam-se os padrões subparalelos, sigmoidais, estruturas de hummocky e truncamentos.

4.4.4 – Perfilagem de Raios Gama

O levantamento dos dados gamaespectrométricos tem por objetivo melhor caracterizar a continuidade lateral das camadas aflorantes na pedreira, de modo a auxiliar na correlação dos perfis estratigráficos levantados.

De maneira geral, as camadas apresentam continuidade lateral visível, podendo conter, em algumas porções, importante fração argilosa. Os domínios definidos de padrão de raios *gama* apresentaram anomalias positivas nas porções superiores de todos os quatro perfis levantados na bancada inferior da pedreira. De maneira similar, nas porções inferiores (primeiros 4 metros a partir do chão da pedreira), foi observado anomalia negativa em todos os perfis, indicando presença maior de material mais grosseiros ou grãos tamanho areia (figura 12).

Após o tratamento dos dados de *raios gama* foram traçadas superfícies de domínios de assinaturas similares, correlacionando os quatro perfis levantados na pedreira. Os perfis foram interpretados e a partir disso propostas dez zonas com padrões de respostas similares. As setas coloridas (verdes, laranjas, vermelhas e azuis) marcam essas similaridades observadas nos quatro perfis laterais (figura 12).

As setas vermelhas marcam maior radiação emitida, por aumento de aporte de material carbonático ou pelítico fino, e posteriormente um momento de queda na radiação (setas azuis) que ocorre em porções com maior fração de areia. Essa assinatura se repete nos quatro perfis. Além disso, a presença de fácies finas (siltíticas e *wackestones*) associadas às maiores radiações (seta vermelha) pode sugerir que essa assinatura gamaespetrométrica marca um pulso transgressivo. Na base, com aumento de frações calcareníticas mais grosseiras (setas azuis), ocorre progradação. As setas verdes e laranjas marcam assinaturas repetitivas em que ocorre predomínio de frações grosseiras calcareníticas, relacionadas a prováveis momentos progradacionais.

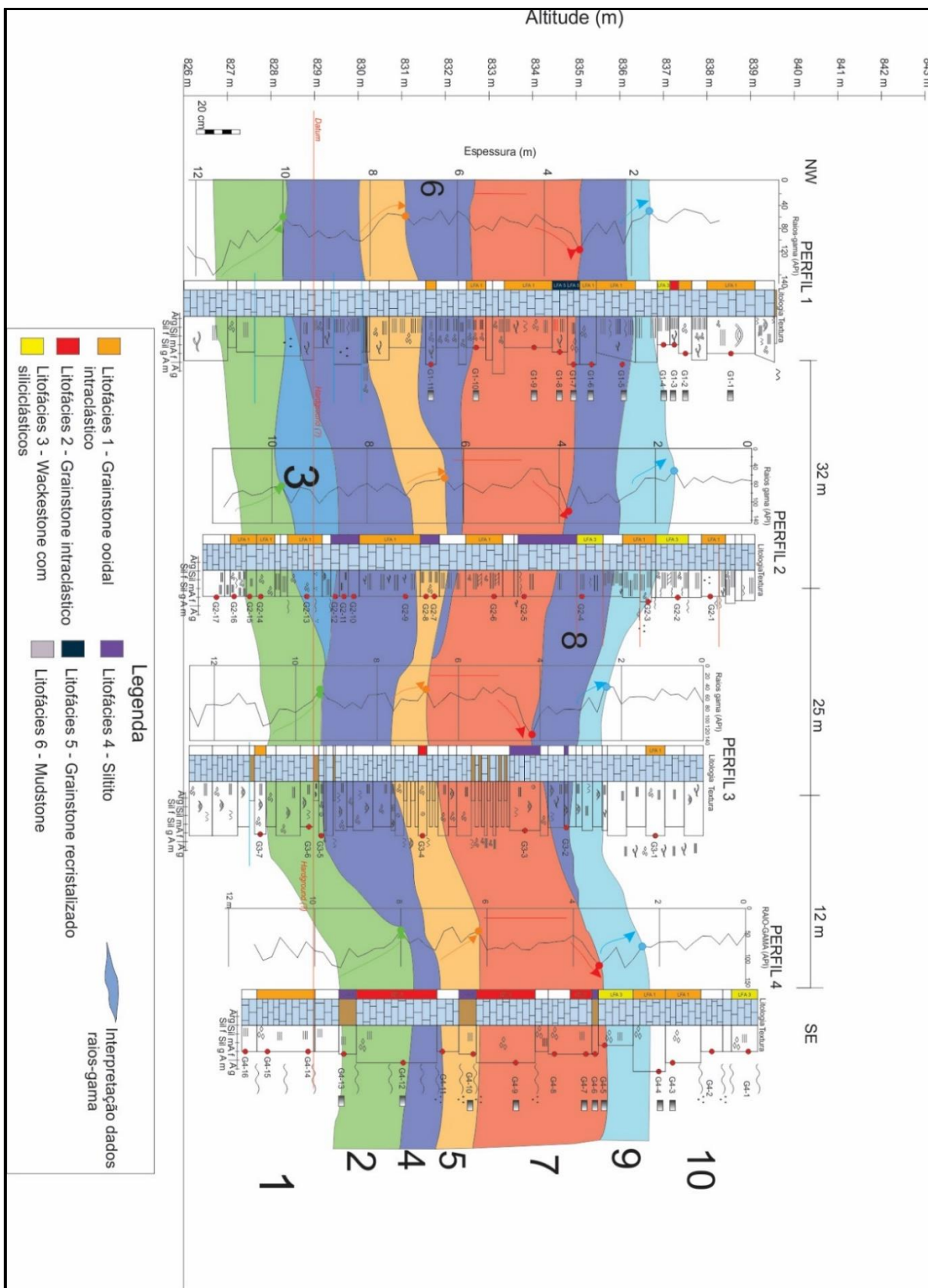


Figura 22: Perfis levantados na bancada inferior da pedra, com indicação das principais microfácies definidas, e correlação lateral desses perfis a partir dos resultados de raios gama. Assinaturas gamaespectrométricas similares foram agrupadas em dez zonas, e as principais anomalias foram marcadas com setas coloridas (azul, verde, vermelho e laranja) nos perfis.

4.4.5 - Geologia Estrutural

A pedreira GMD apresenta camadas subhorizontalizadas, e apresenta ainda fraturas que ocorrem como planos subverticalizados nas frentes de lavra onde foram levantados os perfis verticais, ou apresentando-se como lineamentos no piso da cava. As fraturas foram separadas em 3 famílias principais, classificadas a partir de suas atitudes. Estereogramas e diagramas de setores, a partir do *software stereonet* (figura 13), foram realizados para melhor entendimento, visualização das famílias e a obtenção de dados estatísticos.

A Família 1, que apresenta direção N-S e uma forte tendência de mergulho vertical, tem média dos planos N2E/90,0° (31 medidas), e média de lineamentos (chão da pedreira) N5E (70 medidas). Este conjunto de fraturas destaca-se por suas estruturas estarem frequentemente preenchidas por veios de calcita, com espessuras desde milimétricas a centimétricas.

A Família 2, de direção NE-SW e mergulho subvertical, para NW, tem média planar de N64E/82,6°NW(13 medidas) e linear de N52E (46 medidas). As fraturas desse conjunto encontram-se pouco expressivas, ocorrendo em pequenas dimensões. Veios de calcita preenchendo as fraturas desta família são pouco frequentes.

A Família 3, apresenta um valor médio de N60W/82,6°SW (15 medidas) para seus planos e N77W (37 medidas) para os lineamentos (chão da pedreira). Este conjunto de fraturas subverticalizadas tem uma direção NW-SE, com tendências E-W, e mergulho para sul-sudoeste.

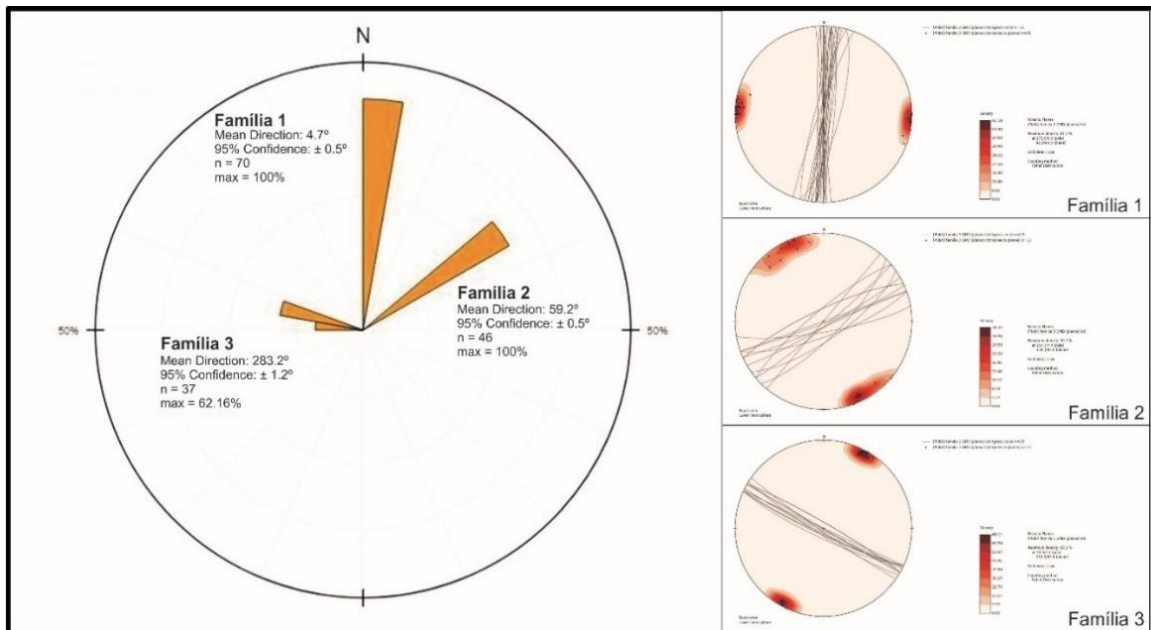


Figura 23: Diagrama de rosetas das principais fraturas observadas na pedreira GMD.

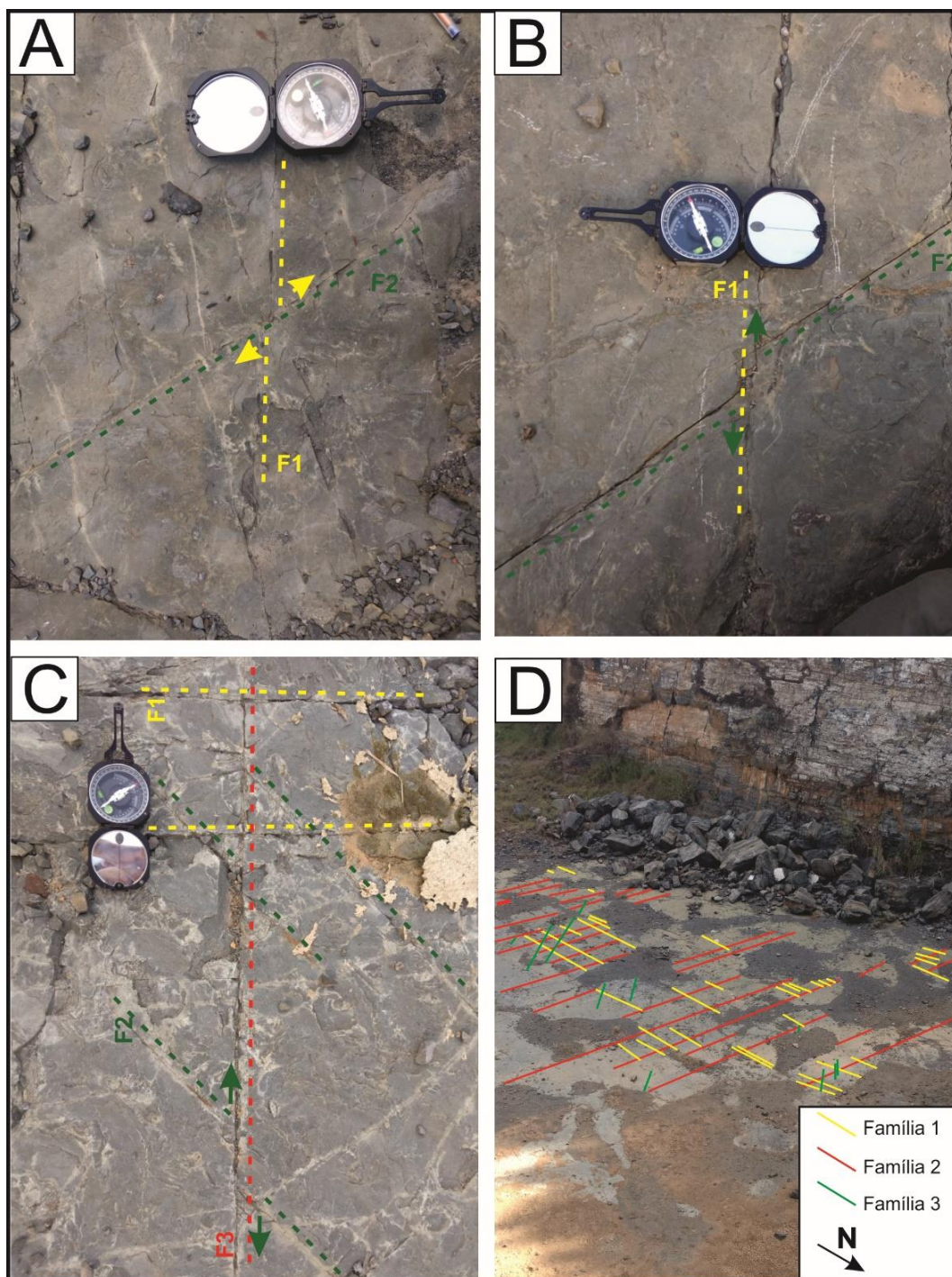


Figura 24: Relação das fraturas presentes na pedreira GMD: A) Família 1 sendo cortada por fraturas da família de 2; B) Família 2 sendo cortada por fraturas da família 1; C) Família 3 cortando as famílias 1 e 2; D) Disposição das fraturas 1, 2 e 3 no chão da pedreira GMD.

4.5 DISCUSSÕES

Os dados de litofácies apresentados e descritos sugerem que a sedimentação da Formação Lagoa do Jacaré na pedreira GMD envolveu

diversos eventos/ciclos tempestíticos, em ambiente marinho raso, na transição shoreface/offshore, em rampa carbonática homoclinal rasa (figuras 15 e 16).

Della Favera (2001) e Plint (2010) definem tempestito como fácies depositadas sob influência de ondas de tempestade. A formação das fácies envolve, na base, materiais de fluxos de detritos grossos, seguido de horizonte com estratificação plano-paralela, seguido por horizonte com presença de estratificação cruzada *hummocky*, e no topo por sedimentos finos depositados na base do *shoreface*. Os autores definem ainda que a estrutura *hummocky* é formada por movimento de fluxo combinado unidirecional e oscilatório, e que os *hardgrounds* representam equivalentes do hemipelágicos dos turbiditos, porém bastante cimentados, e que seriam representativos de momentos de calmaria que separariam pulsos contíguos de tempestade com alta energia. Plint (2010), define ainda que a sequência influenciada por tempestades se inicia com estágios erosivos na base pelítica do *shoreface*, e formação de marcas de sola, deposição de cascalho e, em seguida, de suspensão de material fino. Posteriormente, com a diminuição da tempestade ocorrem estágios deposicionais, momento de queda do fluxo oscilatório e favorecimento de deposição do material em suspensão (figura 15).

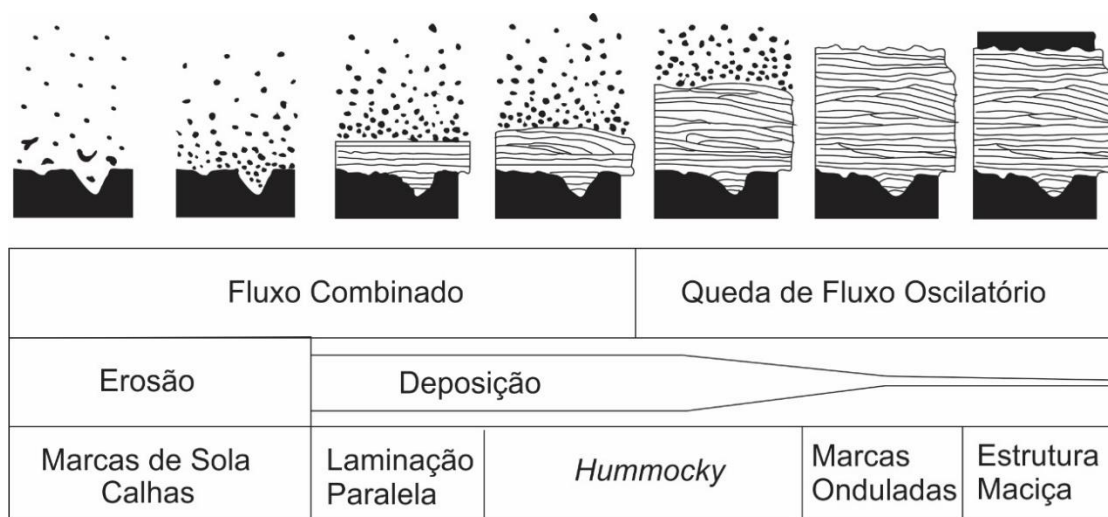


Figura 25: Formação de uma fácies tempestítica idealizada, com as fases erosionais e deposicionais. Modificado de Plint (2010).

A correlação destas definições acima com a descrição de litofácies aflorantes na pedreira sugere que o marcador de início de eventos de tempestades seria a fácies de Brecha Intraclástica (Bi), em função dos intraclastos associados, que seriam representativos de momentos erosivos

devido à grande energia da tempestade atuante que remobiliza o fundo do *shoreface* arrancando e depositando esses clastos. Posteriormente, à medida que se reduz a energia e a tempestade diminui, ocorre a deposição das fácies de Calcarenitos Finos com Marcas Onduladas (Cfo) com laminação plano-paralela associada, e de Calcarenitos com *Hummocky* (Cmh), com *hummocky* associada e *ripples* no topo. A fácies de Calcilutitos e Pelitos (Clu) seria representativa de momentos em que não ocorreria a ação de tempestades, o que favoreceria a decantação de sedimento carbonático/pelítico fino na base do *shoreface*.

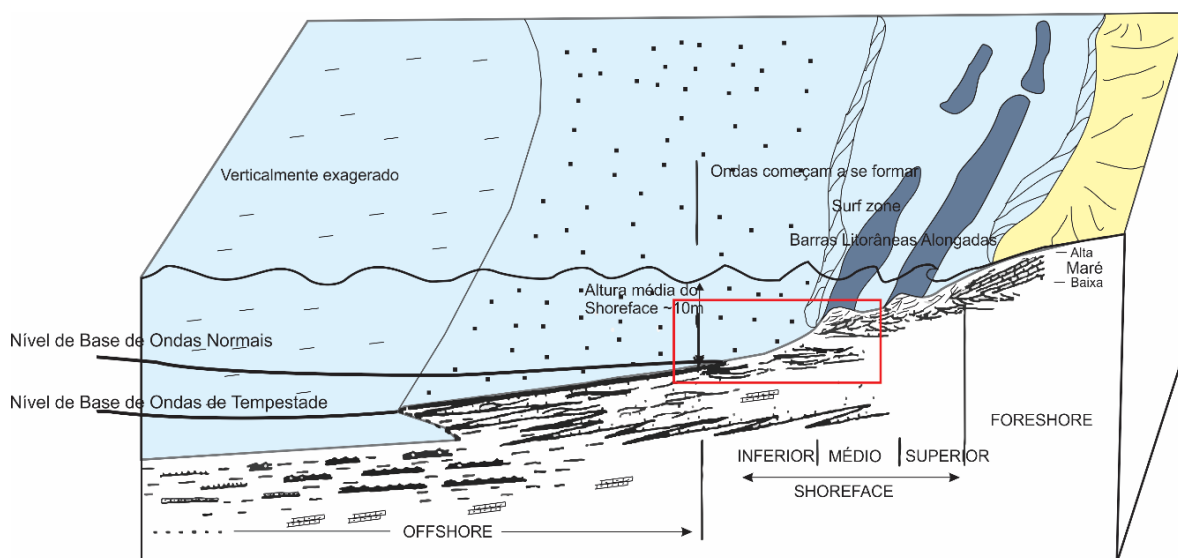


Figura 26: Bloco diagrama representativo da sedimentação por ciclos de tempestade. Local provável da sedimentação da Formação Lagoa do Jacaré na transição shoreface/offshore em vermelho. Modificado de Plint (2010).

A análise petrográfica revelou a existência de seis microfácies, sendo cinco delas rochas carbonáticas e uma siliciclástica. Dentre as fácies carbonáticas foram observados *grainstones* intracláticos e ooidais, além de *grainstones* recristalizados. Foram observados ainda *wackestones* intracláticos e *mudstones*. A microfácies siliciclástica é representada por um siltito. A presença de porções siliciclásticas é indicativo de aumento de aporte terrígeno, gerado possivelmente por contribuição deltaica, retrabalhada pelo evento tempestítico, que aumenta o material em suspensão e posteriormente decanta esse material nos intervalos de quiescência. Ocorrência de microfácies ooidal/peloidal indica

deposição em barras arenosas alongadas – shoal (figura 16), típicas de rampas proximais a médias (Martins e Lemos, 2007; Plint, 2010).

A utilização de resina azul para evidenciar a porosidade primária nas lâminas revelou baixa porosidade nessas rochas, sendo ela associada a fraturas ou arrancamentos de grãos no arcabouço cristalino. A análise por MEV (microscópio eletrônico de varredura) indicou presença de microporosidade por poros ou fraturas nas rochas, mas sem interconectividade entre as mesmas, o que, do ponto de vista dessas rochas como reservatórios de hidrocarbonetos, não seria promissor. A análise evidenciou ainda a presença de grande quantidade de cristais calcíticos envolvendo grãos ooidais e peloidais, além de intraclastos, que pode ser indicativo de que uma única fase de cimento calcítico blocoso (Tonietto, 2010) está presente na rocha, possivelmente formado a partir de recristalização mesodiagenética tardia por soterramento químico.

Os dados de GPR corroboram a tese de que a sucessão de fácies seria representativa de eventos tempestíticos, uma vez que os radargramas apresentam diversas geometrias de truncamentos e estratificação *hummocky*, típicas de registros tempestíticos. A ocorrência de geometrias sigmoidais sugere deposição em plataforma carbonática inclinada, e sua análise indica que pode estar ocorrendo progradação para SE. Os dados de paleocorrentes medidos em *ripple marks* assimétricas, com direção NW-SE e sugerem possível progradação na direção SE.

As curvas de raios gama levantadas permitiram melhor entendimento das correlações faciológicas entre os perfis estudados na pedreira, e sua interpretação levou à definição de dez zonas com assinaturas similares. Essas assinaturas definem intervalos granulométricos (predominância de frações finas ou grosseiras), e auxiliam na correlação lateral dos perfis. A integração desses dados com as microfácies definidas permitiu delimitar possíveis pulsos transgressivos, de menor ordem, em um contexto geral regressivo e progradante, onde ocorre maior emissão de radiação, juntamente com presença de fácies pelíticas.

A análise de superposição das fraturas presentes na pedreira revelou que ora a família 1 aparece cortando a 2 e ora ocorre o contrário (figura 14-A e 14-

B). Por esse motivo, essas famílias podem ser consideradas aproximadamente contemporâneas, tendo sido geradas por um mesmo evento ou eventos simultâneos. Já em relação à família 3, é notório seu contexto de formação tardia, pelo fato dessas estruturas se superporem às outras preexistentes (figura 14-C).

4.6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicada a metodologia CAMURES em um grande afloramento da Formação Lagoa do Jacaré em Paraopeba-MG. A aplicação dos diferentes métodos investigativos, e em diferentes escalas, permitiu avaliar variações faciológicas, sucessão de fácies deposicionais carbonáticas, definir microfácies carbonáticas, caracterizar arquiteturas deposicionais e reconhecer, em caráter preliminar, características permo-porosas das rochas na pedreira GMD.

As litofácies identificadas na pedreira GMD são: brechas intraclásticas, calcarenitos maciços a gradados, com estratificação plana, estratificação por ondas (*hummockys*) e marcas onduladas. Localmente ocorrem intercalações siliciclásticas (siltitos). A deposição ocorreu sob influência de ondas normais e de tempestades, em ambiente marinho raso, alternando fases erosivas (formação de brechas) e fases deposicionais (presença de calcarenitos predominantes). As análises petrográficas permitiram o reconhecimento de 6 microfácies carbonáticas: 1) *grainstone* ooidal intraclástico; 2) *grainstone* intraclástico; 3) *grainstone* recristalizado; 4) *wackestones* intraclásticos; 5) *mudstones* e 6) siltitos. Os resultados do MEV mostram microporosidade por fraturas não interconectadas.

As arquiteturas deposicionais sigmoidais exibidas pelas linhas de GPR levantadas indicaram deposição em rampa carbonática rasa – *shoreface*, podendo ser proximal (presença de microfácies oolíticas) ou distal (microfácies siltíticas e calcilitíticas). As principais geometrias deposicionais observadas foram sigmoidais, lenticulares, plano-paralelas e truncadas. Os dados de *gamma ray* permitiram melhor correlacionar os perfis levantados e apresentaram

alternância entre anomalias positivas, onde ocorre predomínio de sedimentos mais finos, indicando evento transgressivo de menor ordem, e anomalias negativas, onde predominam sedimentos areno-carbonáticos, mais grossos, indicando evento predominante regressivo e prográdante.

A compilação dos dados levantados e interpretados mostrou que os carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré apresentam baixa porosidade primária, mas mostram potencial como reservatório do tipo fraturado. Foram reconhecidas três importantes famílias de fraturas no afloramento, além de microfraturas nas análises por MEV.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F.; Brito Neves, B.B. & Castro Alves, J.A. (1993). Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: *O Cráton do São Francisco*. Dominguez, J.M.L. & Misi, A. (eds), SBG - Núcleo BA/SE: 45-62.
- Alkmim, F.F.; Martins-Neto, M.A. (2001). A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A. (2001). *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. SBG, Belo Horizonte: 9-30.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A. (2012). Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*. 33 (1): 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>.
- Alvarenga, C.J.S., Santos, R.V., Vieira, L.C., Lima, B.A.F., Mancini, L.H. (2014). Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. *Precambrian Research* 251: 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.06.011>.
- Babinski, M., Vieira, L. C., & Trindade, R. I. (2007). Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova*, 19(6): 401-406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>.
- Babinski, M., Pedrosa-Soares, A. C., Trindade, R. I. F. D., Martins, M., Noce, C. M., & Liu, D. (2012). Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: Age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research*, 21(2-3): 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.008>.
- Basso, M., Kuroda, M. C., & Vidal, A. C. (2017). Análise geológica e petrofísica de um bloco de travertino como análogo de reservatório de hidrocarbonetos. *Geologia USP. Série Científica*, 17(2): 211-221. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-337>.

- Caxito, F. A., Halverson, G. P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T. G., & Uhlein, G. J. (2012). Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Research*, 200: 38-58. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.005>.
- CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais & CPRM-Serv. Geol. do Brasil. (2014). Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais – Versão Atualizada. CPRM-CODEMIG, Belo Horizonte Escala 1:1.000.000.
- Dardenne, M. A. (1978). Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 30, pp. 597-610).
- Della Fávera, J. C. (2001). *Fundamentos de Estratigrafia Moderna*. EdUERJ. 4ª edição. 263p.
- Dunham, R.J. (1962) Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture. *American Association of Petroleum Geologists*, 1, 108-121.
- Feboli W.L. (2008). Folha Pompeu, escala 1:100.000. CPRM- -Serv. Geol. do Brasil. CPRM-MME, Brasília.
- Ferreira, J. F. F., Candido, A. G., Rostirolla, S. P. (2010). Correlação Gamaespectrométrica de Afloramentos e Poços: Estudo de Caso na Formação Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*. 28(3): 371-396. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300005>.
- Forte, E., Pipan, M. (2011). Reservoir Analogues Characterization by Means of GPR. In *EAGE/SEG Summer Research Workshop-Towards a Full Integration from Geosciences to Reservoir Simulation*. Trieste, Italy. <http://doi.org/10.3997/2214-4609.201402465>
- Forte, E., Pipan, M., Casabianca, D., Di Cuia, R., & Riva, A. (2012). Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.009>.
- Fugita A.M. & Clark-Filho J.G. (2001). Recursos Energéticos da Bacia do São Francisco: Hidrocarbonetos líquidos e gasosos. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.). *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), p. 265-284.
- Garcia, A. J., Ribeiro, D. M., Figueiredo, S. A. S., Dantas, M. V. S., Oliveira, I., Leite, K. A. S., & Garcia, G. G. (2015). *3D Modeling of Carbonate Reservoir Analogue Outcrops Using CAMURES Methodology, Sergipe/Alagoas Basin (SEAL), Northeastern Brazil*. In: AAPG Annual Convention and Exhibition. Denver, CO.
- Halverson, G.P., Hoffman, P.F., Schrag, D.P., Maloof, A.C., Rice, A.H.N., 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *GSA Bulletin* 117 (9–10), 1181–1207.
- Hilbert, N. N. (2016). *Heterogeneidades em multiescala da Formação Marizal (Aptiano, Bacia do Tucano, BA) como análogo de reservatórios fluviais em*

- bacias distensionais*. Dissertação (mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP. 165p.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., & Schrag, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *science*, 281(5381), 1342-1346. <http://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342>.
- Koehrer, B., M. Zeller, T. Aigner, M. Poepfelreiter, P. Milroy, H. Forke and S. Al-Kindi (2010). Facies and stratigraphic framework of a Khuff outcrop equivalent: Saiq and Mahil formations, Al Jabal al-Akhdar, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, v. 15, no. 2, p. 91-156.
- Kuchenbecker, M. (2011). Químioestratigrafia e proveniência sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG) (Msc thesis) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 91.
- Lira, A. R. A (2004). *Caracterização em multiescala de análogos de reservatórios da formação Maceió (aptiano da Bacia de Alagoas), nas regiões de Japaratinga e Morros de Camaragibe-AL*. Tese (Doutorado). Recife: Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE. 184p.
- Martinez, M. I., (2007). *Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências - UFMG. 147p.
- Martins M., Lemos V.B., (2007). Análise estratigráfica das sequências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):156-167. <http://doi.org/10.25249/0375-7536.200737S4156167>.
- Martins-Neto, M.A., (2009). Sequence Stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 26, 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.001>
- Melani, L. H. (2015). *Caracterização petrofísica de reservatório carbonático*. Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências -. UNICAMP. 103p.
- Menezes, L. (2004). *Mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos: exemplos para depósitos fluviais da Unidade Açú-3-Bacia Potiguar*. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra - UFRN. 118p.
- Paim P. S. G.; Garcia A. J. V.; Faccini U. F.; Lavina E. L. C. (2003). Geoarq, uma abordagem integrada e aplicada da Geologia Sedimentar. *In: Paim, P. S. G., Faccini, U. F., Netto, R. G. (eds). Geometria, Arquitetura e Heterogeneidades de Corpos Sedimentares: Estudo de Casos*. São Leopoldo – RS. Pub. Do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale Rio dos Sinos. Editora Unisinos. p 16-24.
- Paula-Santos, G. M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano-Filho, S., Trindade, R. I., Pedrosa-Soares, A. C. (2015). New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 28(2): 702-720.

<https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>.

- Paula-Santos, G. M., Caetano-Filho, S., Babinski, M., Trindade, R. I., Guacaneme, C. (2017). Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 42: 280-305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.012>.
- Pinto C.P., Pinho J.M.M., Sousa H.A. de. (2001). Recursos minerais e energéticos da Bacia do São Francisco em Minas Gerais: uma abordagem regional. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.). *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), p. 139-160.
- Plint, A. G. (2010). Wave-and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. In: James, N. P., Dalrymple, R. W. (eds). *Facies Models 4*; Geological Association of Canada: p167-200.
- Reed, S. J. B. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology* (Cambridge: Cambridge University Press). Second Edition.
- Reis, C. S. (2013). *Geologia, sistemas deposicionais e estratigrafia isotópica do Grupo Bambuí na região de Santa Maria da Vitória, BA*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências - Universidade de Brasília. 97p.
- Reis H. L. S.; Alkmim F.F. (2015). Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 66(4):711-731. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.07.013
- Reis, H. L. S. (2018). Gás Natural. In: Pedrosa-Soares, A. C.; Voll, E.; Cunha, E. C. (eds). *Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais*. Belo Horizonte. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais – CODEMGE.
- Rodrigues, Y. C. (2018). *Inunditos como análogos de reservatórios: um exemplo nos depósitos gonduânicos triássicos do Gráben Arroio Moirão, RS*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS. 72p.
- Tatum, D. I., & Francke, J. (2012). Constructing hydrocarbon reservoir analogues of aeolian systems using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.014>.
- Tonietto S.N. (2010). *Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozoicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB. 167p.
- Tuller M.P. (2009). Folha Sete Lagoas, esc. 1:100.000. CPRM-Serv. Geol. do Brasil- MME, Brasília.
- Tuller, M. P., Ribeiro, J. H., Signorelli, N., Féboli, W. L. (2009) Projeto Sete Lagoas - Abaeté: Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2010. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB.

- Uhlein, A.; Ersinzon, F.; Uhlein, G.J.; Alcântara, D.G. (2017). Estratigrafia e sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço e grupos Bambuí e Macaúbas: roteiro de campo na Serra do Espinhaço Meridional (MG). *Terrae Didactica*, 13:244–257. doi:10.20396/td.v13i3.8650963
- Uhlein, G. J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G. P., Caxito, F. A., & Cox, G. M. (2017). Early to Late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 299, 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.020>.
- Ulbricht, H. H. G. J., Ulbricht, M. N. C., Ferreira, F. J. F., Alves, L. S., Guimarães G. B., Fruchting A. (2009). Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. *Geologia USP, Serie Científica*, São Paulo, 9(1): 33–53. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2009000100003>.
- Vieira, L.C., Trindade, R.I.F., Nogueira, A.C.R., Ader, M. (2007). Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus Geosciences* 339, 240–258. <http://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.003>.
- Warren, L. V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M. G., Poiré, D. G., Strikis, N. M., Anelli, L. E., Strikis, P. C. (2014). The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42(5), 391-394. <https://doi.org/10.1130/G35304.1>.
- Zalán, P. V., & Romeiro-Silva, P. C. (2007). Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 15(2), 561-571.

CAPÍTULO 5: MODELAGEM GEOLÓGICA 3D

5.1 INTRODUÇÃO

A caracterização e modelagem de heterogeneidade geológica são usados para descrever reservatórios de hidrocarbonetos com a finalidade de apoiar a tomada de decisões na presença de incertezas (Pyrzcz, *et al.*, 2015). Muitos projetos de modelagem de reservatórios têm incertezas relacionadas a fatores como: 1) heterogeneidade do reservatório não revelada por poços e abaixo da resolução sísmica; 2) dados de amostra escassos; e 3) variáveis sensíveis como as derivadas da simulação de fluxo (Caers, 2011). Um modelo geológico é a representação espacial das propriedades do reservatório (afloramento análogo) como fácies, arquitetura deposicional, dados estruturais, porosidade, etc.

A etapa de modelagem executada neste trabalho tem por objetivo integrar todos os resultados provenientes dos levantamentos e análises anteriormente realizados, em diversas escalas de análise, e proceder a criação de um modelo geocelular 3D da pedreira GMD. Para tanto, foi utilizado o software RMS Roxar-Emerson que permitiu realizar a interpolação matemática dos dados de microfácies interpretados a partir de lâminas petrográficas, combinados com interpretações de dados gamaespectrométricos, e com a correlação lateral dos perfis levantados. As atividades de interpolação foram feitas a partir de algoritmos matemáticos que geram modelos determinísticos ou estocásticos.

Os modelos determinísticos levam em consideração interpretações de dados diretos e indiretos de reservatório, não levando em consideração variáveis aleatórias, e com isso não reconhecendo as incertezas presentes nos modelos (Gauw, 2007). Entende-se ter o total controle de todas as variáveis inerentes ao modelo. Por outro lado, os modelos estocásticos levam em consideração incertezas, e permitem integrar diversos dados do afloramento modelado, de forma a permitir a geração de múltiplos cenários a partir de dados pontuais ou características deposicionais (Gauw; 2007; Pyrcz *et al.*, 2015; Colombera *et al.*, 2018).

As modelagens estocásticas mais utilizadas para reservatórios de hidrocarbonetos representam os tipos orientados a pixel e a objeto. O modelo orientado a pixel leva em consideração a variável de interesse assumida como uma função contínua aleatória (Reyes-Perez, 2008), na qual um ponto (pixel) conhecido é interpolado baseado em sua relação espacial com seus vizinhos (*nearest neighbor*) em busca de diferentes intervalos de fácies. Na modelagem orientada a objeto leva-se em conta a geometria conhecida dos corpos sedimentares, e parâmetros como litologia, espessura e orientação das camadas. Em relação à pedreira, foi utilizado o tipo orientado a pixel, haja vista a ausência de controle total das propriedades e parâmetros que justifiquem a utilização do tipo orientado a objeto.

Ainda segundo Gauw 2007, ambos os tipos de modelagem se integram em um amplo *workflow* que deve ser adaptado para cada situação e problemática encontrada. Entende-se que dados pontuais e conhecidos (determinísticos) sejam interpolados de forma a gerar modelos estocásticos, com certa incerteza em relação à distribuição espacial dos dados determinísticos.

Diante disso, o conceito de geoestatística compreende uma importante etapa do processo exploratório e de análise de reservatórios de hidrocarbonetos, uma vez que auxilia na geração de modelos preditivos. A geoestatística trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais tem um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas (Reyes-Perez, 2008). Ainda que a variável regionalizada seja contínua no espaço, geralmente não é possível conhecer os seus valores em todos os pontos, mas sim apenas em alguns que foram obtidos por amostragem (Landim, 2003).

Dentre as ferramentas geoestatísticas, duas muito empregadas em modelagem de reservatórios representam o variograma e a krigagem. Um variograma representa a medida da variabilidade geológica entre dois pontos no reservatório (geometria, continuidade, e distribuição de uma propriedade em diferentes direções) (Orellana *et al.*, 2014; Oliver e Webster, 2014). O variograma é desenvolvido a partir de funções de correlação estatística entre dois pontos, e exerce papel fundamental na construção de modelos estáticos de reservatórios

(Orellana *et al.*, 2014). Já a krigagem corresponde a um método de estimar uma variável regional em um ponto, uma área ou sobre um volume, a partir da combinação linear de um conjunto valores em um determinado espaço (Ochie e Rotimi, 2018; Oliver e Webster, 2014). Trata-se de um processo de estimativa por médias, dos valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes. Este método atribui pesos ótimos para as amostras de valores conhecidos que irão estimar os pontos desconhecidos (Réyes-Perez, 2008).

O *workflow* simplificado adotado para a modelagem da pedreira GMD compreende a definição de um modelo estrutural inicial com horizontes (uma vez que não foram mapeadas falhas no afloramento), posteriormente a construção de um grid com o zoneamento estratigráfico adotado (a partir dos dados de *gamma-ray*), definição do modelo deposicional e finalmente a modelagem de fácies a partir do preenchimento dos zoneamentos com as fácies observadas (Figura 27). A figura 28 apresenta o organograma detalhado das etapas realizadas durante as atividades de modelagem.

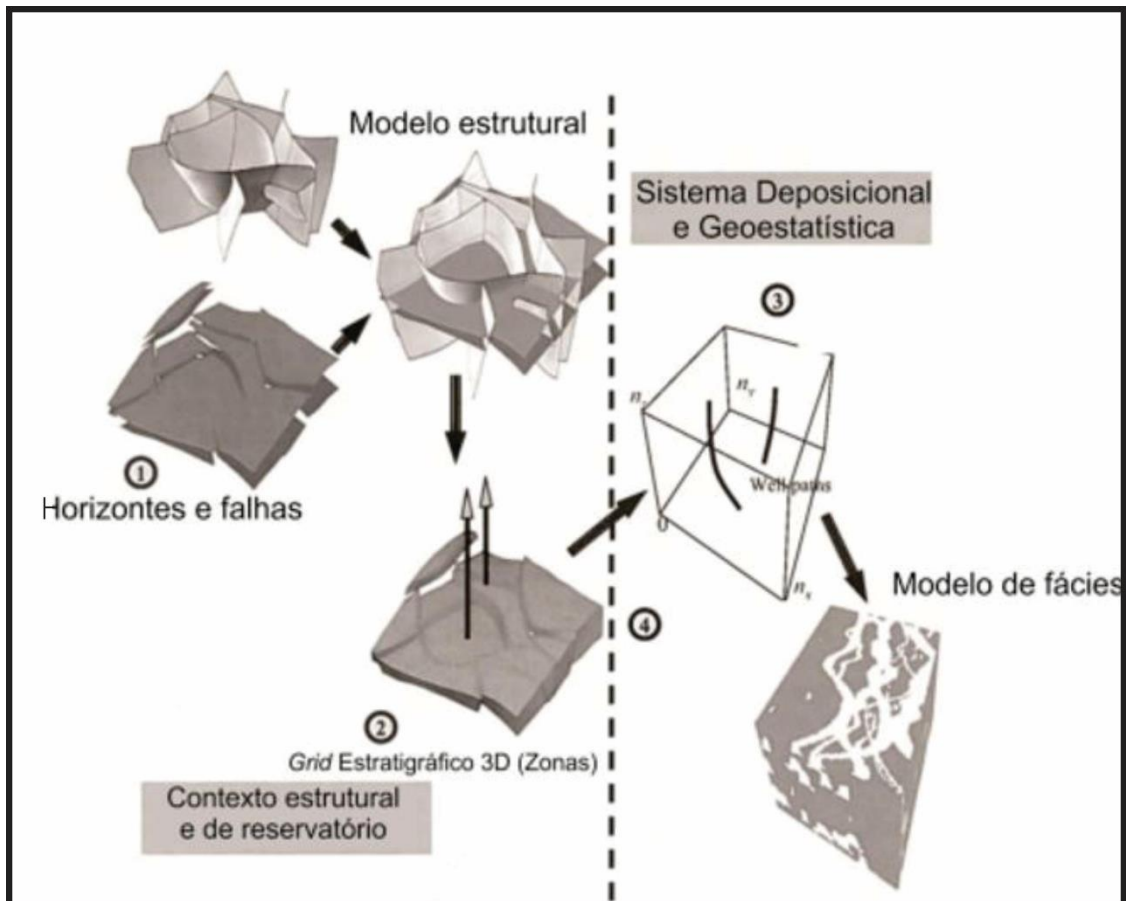


Figura 27: Workflow adotado nos trabalhos de modelagem geológica executadas na pedreira GMD. (Modificado de Caers 2005).

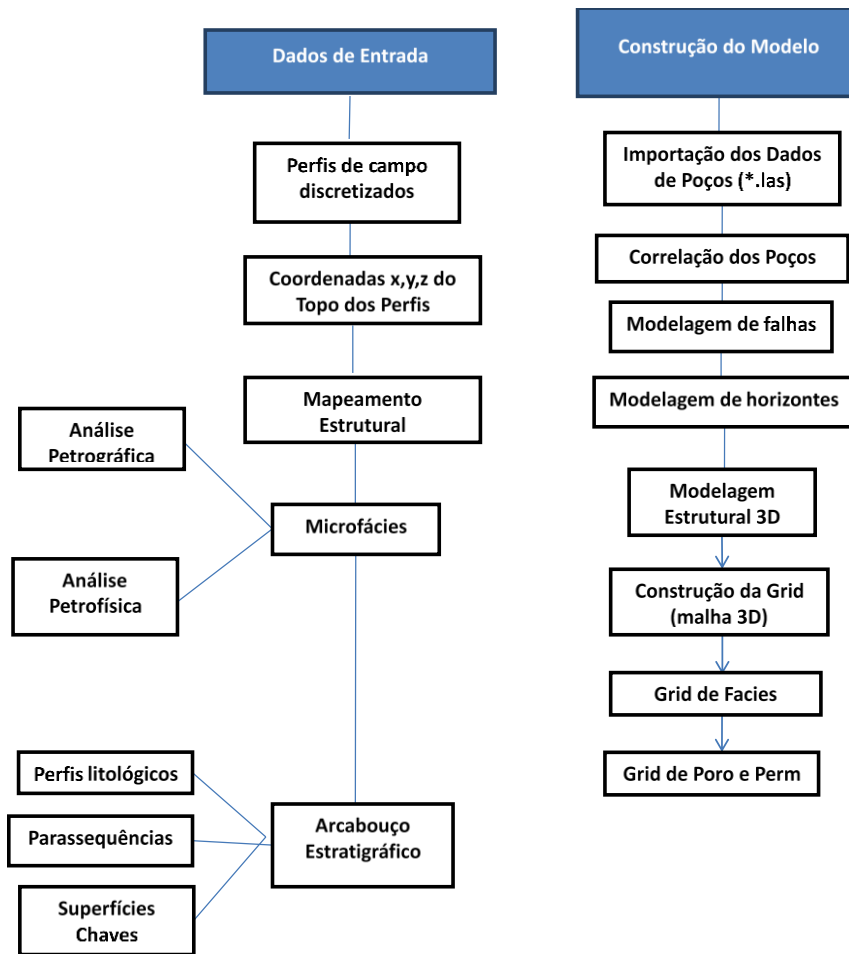


Figura 28: Organograma detalhado da modelagem de fácies feita pela metodologia CAMURES..

5.2 MODELAGEM 3D DA PEDREIRA GMD

Os altos custos inerentes às atividades em bacias petrolíferas tornaram os estudos de afloramentos análogos necessários para o melhor entendimento dos *plays* exploratórios. Os análogos auxiliam na construção de modelos mais realísticos e precisos dos diversos tipos de reservatórios, e permitem a observação das feições em mesoescala como geometrias e arquiteturas deposicionais e correlação lateral de perfis, bem como em microescala, por permitirem a amostragem sistemática para estudos petrofísicos, que não são possíveis a partir de levantamentos sísmicos e poços em escala de bacia.

Os dados levantados durante os trabalhos na pedreira GMD compreendem descrição de perfis verticais litofaciológicos dispostos lateralmente, mosaicos fotográficos, lâminas petrográficas (análise de microfácies) e dados gamaespetrométricos (representados em °API). Para as atividades de modelagem foi utilizado do software RMS da Roxar-Emerson disponibilizado pelo laboratório Progeologia da Universidade Federal de Sergipe por representar uma ferramenta de fácil utilização, e amplamente utilizada na indústria petrolífera.

5.2.1 Ground Penetrating Radar (GPR)

As etapas iniciais da modelagem de reservatórios envolvem a interpretação de seções sísmicas de reflexão ou de perfilagem de poços, de forma a permitir o mapeamento de superfícies-chave que irão embasar as outras etapas interpretativas. Entretanto, pesquisas sísmicas, em escala de afloramento, irão gerar dados com pouca representatividade, uma vez que esse método geofísico tende a ser utilizado em escalas regionais.

Diante disso, a sísmica de reflexão foi substituída pelo método do GPR, que permite uma melhor resolução para a escala de trabalho adotada, e tem como produto radargramas que permitem o imageamento raso de subsuperfície. Esses dados embasaram o reconhecimento as principais geometrias e

arquiteturas deposicionais presentes nas rochas da pedreira e de superfícies importantes para o desenvolvimento da metodologia CAMURES na pedreira.

Os resultados evidenciaram que o pacote carbonático da pedreira GMD apresentou radarfácies plano-paralelas contínuas lateralmente, *hummockys* com evidência de fluxo na direção SE, além de padrões sigmoidais e descontínuos.

5.2.2 Perfis Verticais (Pseudo-Poços)

Os perfis litológicos, com fácies e microfácies sedimentares, são os dados mais importantes para realização da modelagem 3D, uma vez que os radargramas, foram utilizados como dados auxiliares na interpretação de parâmetros de geometria e arquitetura. Os dados obtidos em campo foram todos transformados em planilhas de arquivos bloco de notas (tipo LAS) que o software aceita como dado de entrada. Os perfis verticais apresentam os dados do tipo contínuo (espessura de camadas), e discreto (microfácies e zoneamento estratigráfico).

O trabalho de modelagem em um único afloramento com as dimensões da pedreira GMD pode resultar em pouca diferença das litologias modeladas. Isto acontece porque a variação de litofácies pode não ser visível em escala de amostra-de-mão, e desta forma o resultado pode ser do tipo “bolo de camadas”. Devido à uniformidade apresentada em escala de amostra-de-mão, a modelagem foi realizada com as microfácies definidas petrograficamente, aumentando a heterogeneidade do resultado final, afastando-se do modelo de “*layer cake*”, ou bolo de camadas, assim como feito por Tomassetti *et al.* (2018), Jung e Aigner (2012), Palermo *et al.* (2010) e Palermo *et al.* (2012).

Os perfis verticais e a correlação lateral entre eles permitiram a construção de um zoneamento estratigráfico na pedreira que auxiliou as etapas seguintes da modelagem. O resultado da correlação lateral dos perfis é apresentado na figura 22, que mostra os dados de microfácies relativos a cada perfil, e apresenta o traçado das superfícies (horizontes) que nortearam a próxima etapa de zoneamento estratigráfico.

Correlação Lateral dos Perfis

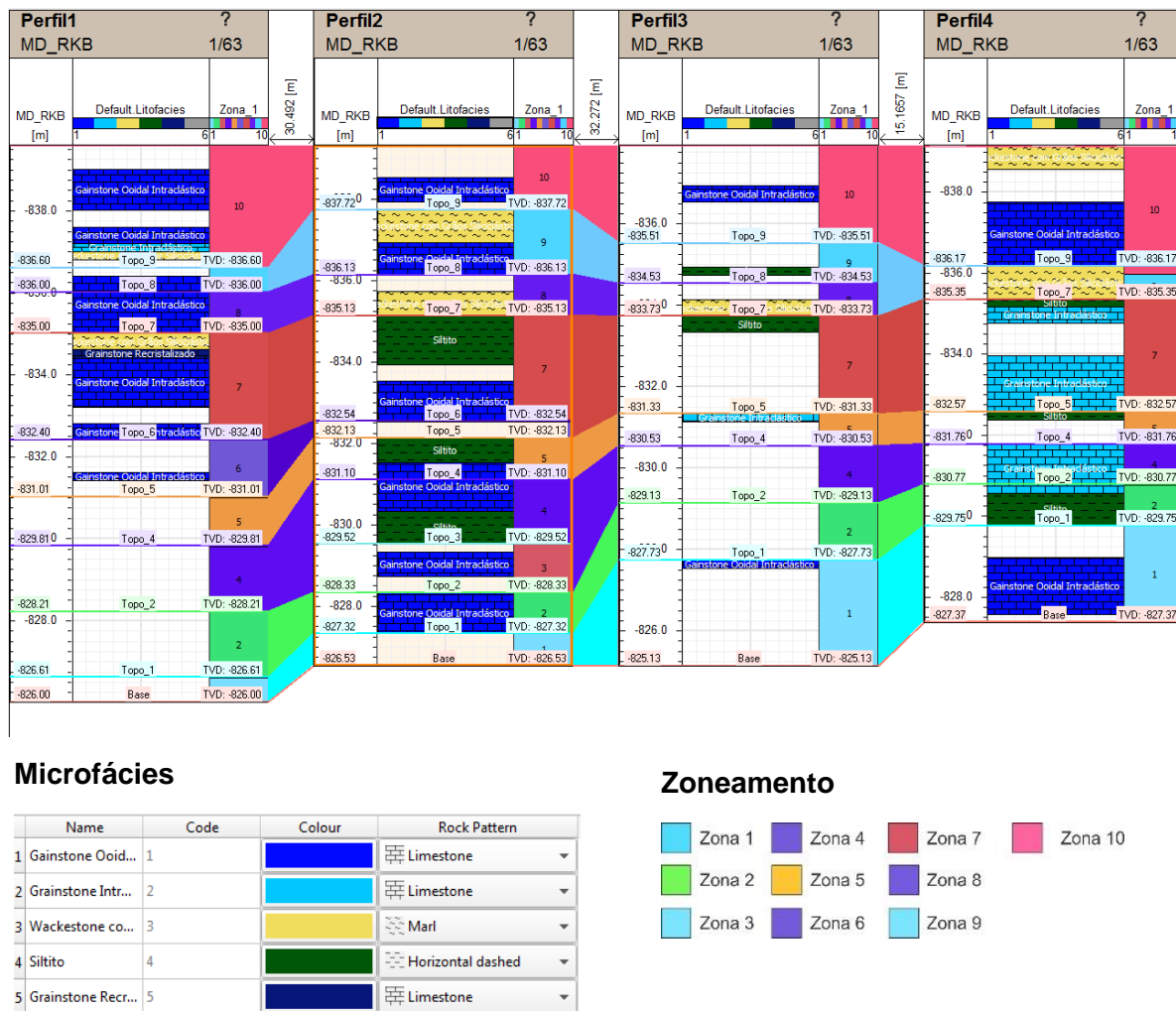


Figura 29: Correlation View dos quatro poços levantados na base da pedra GMD mostrando a correlação lateral entre os poços, bem como o preenchimento dos intervalos com as microfácies, e definição do zoneamento inicial.

5.2.3 Zoneamento Estratigráfico

A modelagem geológica 3D baseia-se zonas de interesse nas quais serão feitas as interpolações dos dados modelados, sejam eles petrográficos, faciológicos ou arquiteturas. Estas zonas devem apresentar características texturais, deposicionais ou estratigráficas semelhantes, que justifiquem seu agrupamento em um mesmo nível. O mais comum é o zoneamento estratigráfico, uma vez que reflete quebras no registro geológico, e por isso, delimita intervalos estratigráficos com litofácies ou microfácies cogenéticas, além de definir superfícies chave para a interpretação. Caso o modelo estudado não esteja compartimentado em zonas, os dados modelados serão interpolados

arbitrariamente, sem seguir critérios específicos já conhecidos definidos para cada intervalo.

A pedreira GMD, apresenta uma certa uniformidade de suas rochas, o que dificultou a definição de um zoneamento pelo critério estratigráfico, ou seja, as sucessões sedimentares descritas não apresentam quebras significativas no registro sedimentar que justifiquem definição de zonas de interesse. Por esse motivo, foram utilizados os dados de raios-gama para definir as zonas correlacionáveis, ou com mesma resposta gamaespectrométrica, para modelagem de fácies. Ao analisar a resposta gamaespectrométrica foi considerado que os níveis delimitados pelas curvas apresentariam microfácies semelhantes nos perfis dispostos lateralmente.

É possível observar na figura 22, as tendências marcadas pelas setas nas cores verde, laranja, vermelha e azul, usadas para facilitar as observações. Esta imagem reúne os dados necessários para serem inseridos no modelo, como as microfácies e suas espessuras em cada perfil litológico, a altitude e o zoneamento interpretado. Na modelagem realizada, foram utilizadas 5 microfácies, separadas em 10 zonas seguindo a metodologia definida acima. Dentro de cada zona, foi modelada a microfácies que ocorre verticalmente no perfil colunar.

Para gerar as zonas no RMS® é preciso criar os seus limites, inferior e superior, que representam horizontes. Os horizontes, neste trabalho, são superfícies que tem função de delimitador das zonas definidas na análise dos dados *gama-ray* dos perfis. Estas superfícies apresentam variações de altitude de acordo com os pontos os quais elas interceptam cada perfil, os *well-picks*. Estes *well-picks* definem, portanto, as superfícies-chave (horizontes) do modelo, de modo que em modelagem de reservatório são exatamente os pontos, dos perfis (ou poços), nos quais passam as superfícies-chave estratigráficas. A Figura 30 mostra a representação espacial dos perfis, com os *well picks* indicando onde essas zonas cortam cada perfil. A Figura 31 mostra a representação dos horizontes definidos pelos *well-picks*. Nela, as cores mais quentes estão relacionadas às maiores altitudes onde os horizontes criados atravessam. As cores frias, em tons de azul, representam altitudes menores.

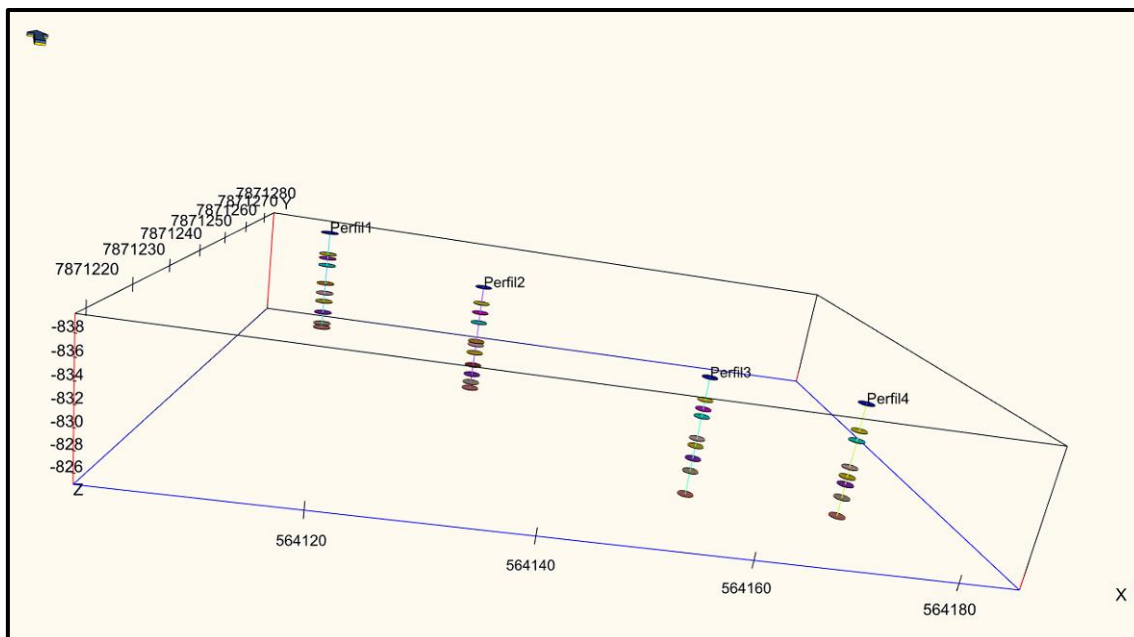


Figura 30: Perfis verticais importados no RMS como pseudopoços e os well-picks que definem o zoneamento estratigráfico. Com exagero vertical.

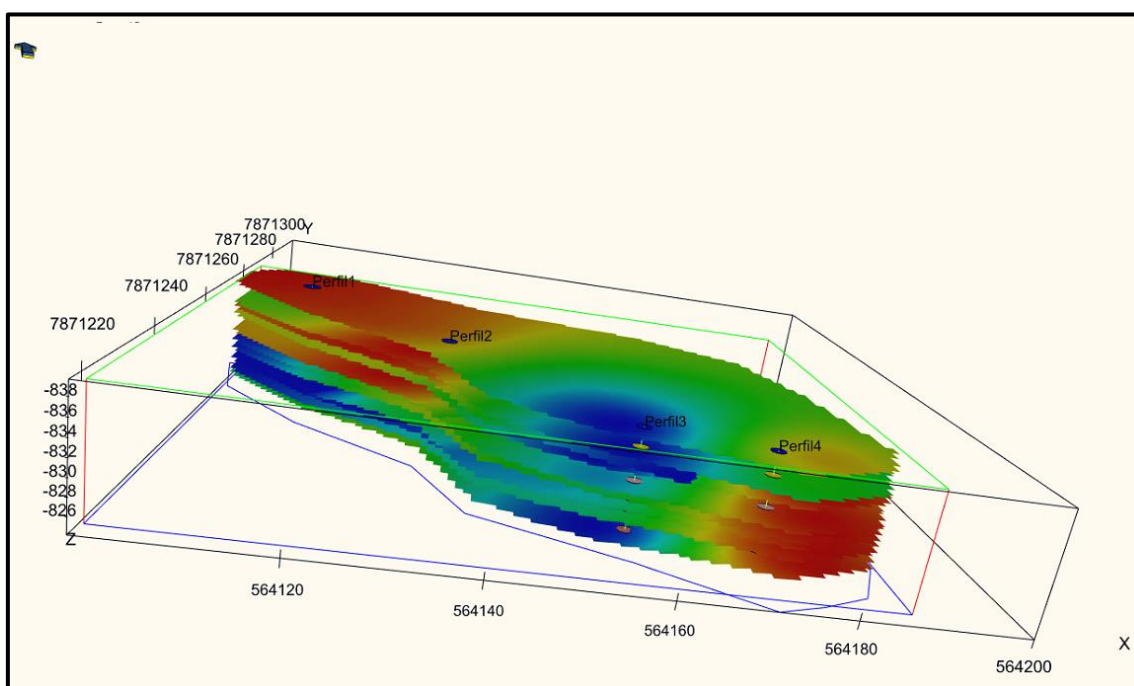


Figura 31: Horizontes gerados a partir da correlação dos well-picks. As cores vermelhas evidenciam, em cada horizonte gerado, as topografias mais elevadas, enquanto que as cores azuis, topografias mais baixas. A imagem apresenta exagero vertical.

Após a criação dos horizontes, é possível proceder a modelagem de zonas, uma vez que os horizontes irão definir topos e bases de cada zona interpretada. O zoneamento criado irá auxiliar a etapa de gridagem, e permitirá

posteriormente, uma melhor precisão do preenchimento do grid geocelular durante a geração do modelo de fácies.

As figuras 32 e 33 apresentam o zoneamento criado, no qual foram definidas dez zonas. A região acima da zona 10, chamada de sobrecarga (*overburden*), é criada automaticamente pelo *software* de forma a permitir o fechamento do bloco. Esta porção do modelo não será utilizada na construção do grid 3D e não será preenchida com as propriedades mapeadas. Na figura 32 tem-se a visão geral do bloco 3D com as zonas criadas, e a figura 33 mostra a visualização de uma seção gerada (*intersection view*) que intercepta os quatro perfis levantados na pedreira.

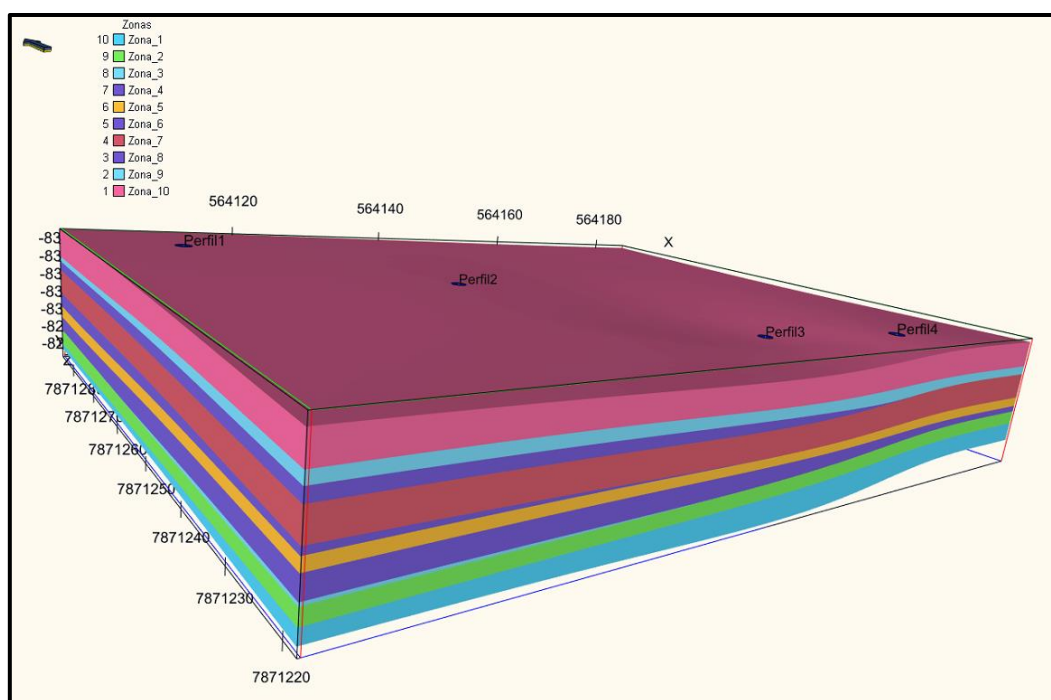


Figura 32: Bloco 3D com o zoneamento gerado pelo RMS. Apresenta exagero vertical.

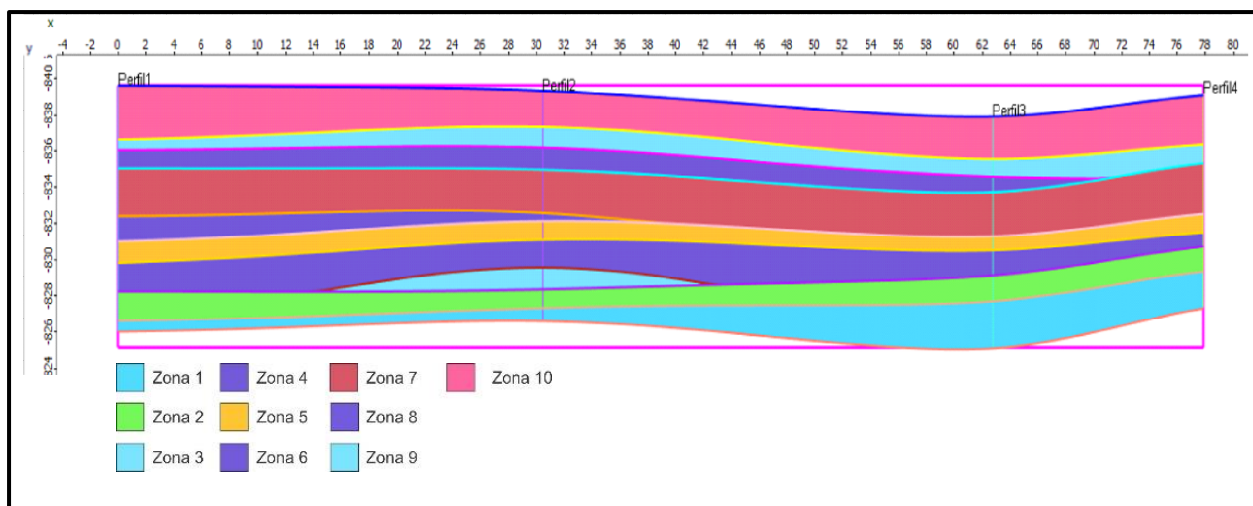


Figura 33: Intersection view com os perfis 1, 2, 3 e 4 levantados na pedreira GMD. Contém exagero vertical.

5.2.4 Grid 3D

A criação do grid 3D tem como objetivo dividir o modelo estrutural em pequenas células (ou cubos) (Passarella, 2012). Os dados mapeados foram inseridos em cada uma dessas células de acordo com sua proximidade do perfil, de modo que cada célula tenha somente um valor para cada propriedade. Cada célula deve ter tamanho ajustado para refletir as menores variações laterais e verticais de cada microfácies.

O grid criado para o modelo da pedreira GMD tem 606.900 células. Nas direções X e Y o grid foi construído de maneira regular, tendo cada célula a medida de 1 x 1 m. Verticalmente, as células foram distribuídas de maneira irregular em cada zona, de modo a tentar representar a espessura da camada mais delgada, para evitar a perda de informação. Para tanto, a dimensão vertical das células não excedeu metade da menor espessura de camadas observada (Qi *et al.*, 2007; Amour *et al.*, 2011; Tomassetti *et al.*, 2018; Adelu, 2019). A menor espessura de camadas observada foi de 0,20 m e a maior foi de 1,00 m.

As zonas 2, 3, 7, 9 e 10 apresentaram 10 células na vertical. As zonas 5, 6 e 8 têm 5 células, pois são as zonas de menor espessura. Já as zonas 1 e 4, por serem as de maior espessura, foram modeladas com 20 células. Na Figura 24 apresentam-se os resultados da construção do grid geocelular das zonas

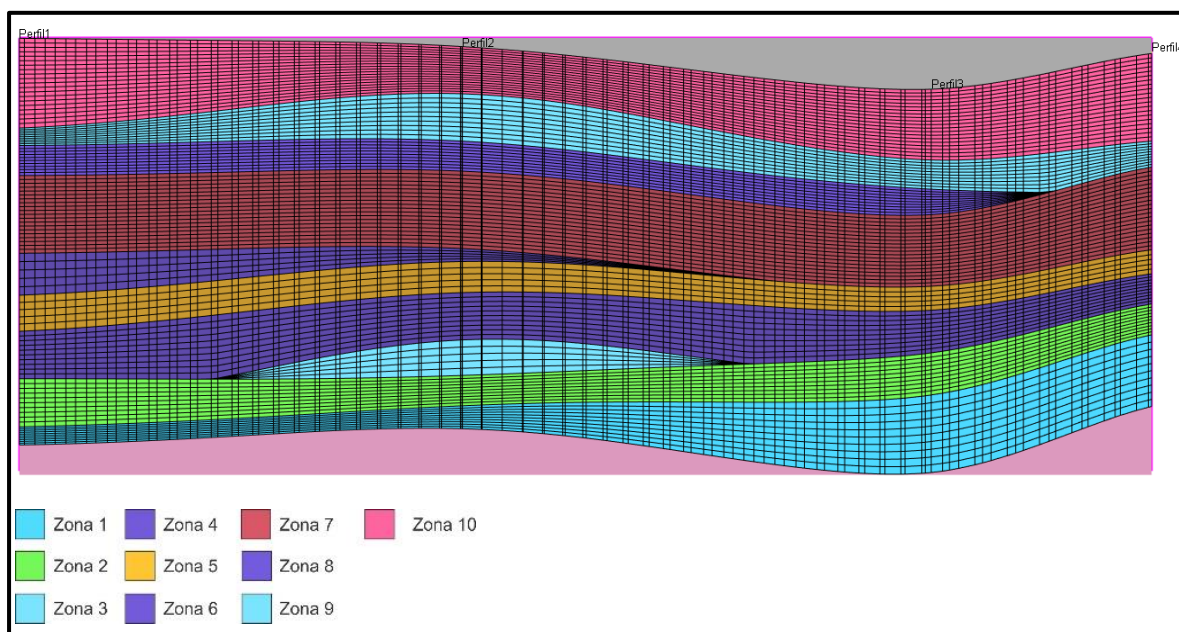


Figura 34: Intersection view do Grid 3D das zonas do modelo da pedra. Notar a variação de células verticais em cada zona. Com exagero vertical.

As propriedades faciológicas definidas devem preencher as células no entorno de cada perfil, para que o software processe a interpolação das propriedades e crie modelos específicos. Esta etapa consiste em imputar os dados das microfácies em cada intervalo dos perfis, e proceder a criação de *blocked wells*, que representam células vizinhas aos perfis que são preenchidas com as propriedades presentes em cada perfil. A “blockagem” preencherá os perfis com as informações de microfácies de cores variadas e na ausência de dados o preenchimento ficará na cor cinza escuro (figura 25-A).

Após a criação dos *blocked wells* é necessário proceder a validação dos dados imputados de forma a verificar a consistência dos mesmos em relação aos dados iniciais. A figura 25-B exemplifica uma situação em que o dado criado pelo *software* indicou uma camada de siltito num contexto de *grainstone* intraclástico. Esta etapa busca a minimização dos erros inerentes à modelagem, bem como aumentar a confiabilidade do modelo gerado.

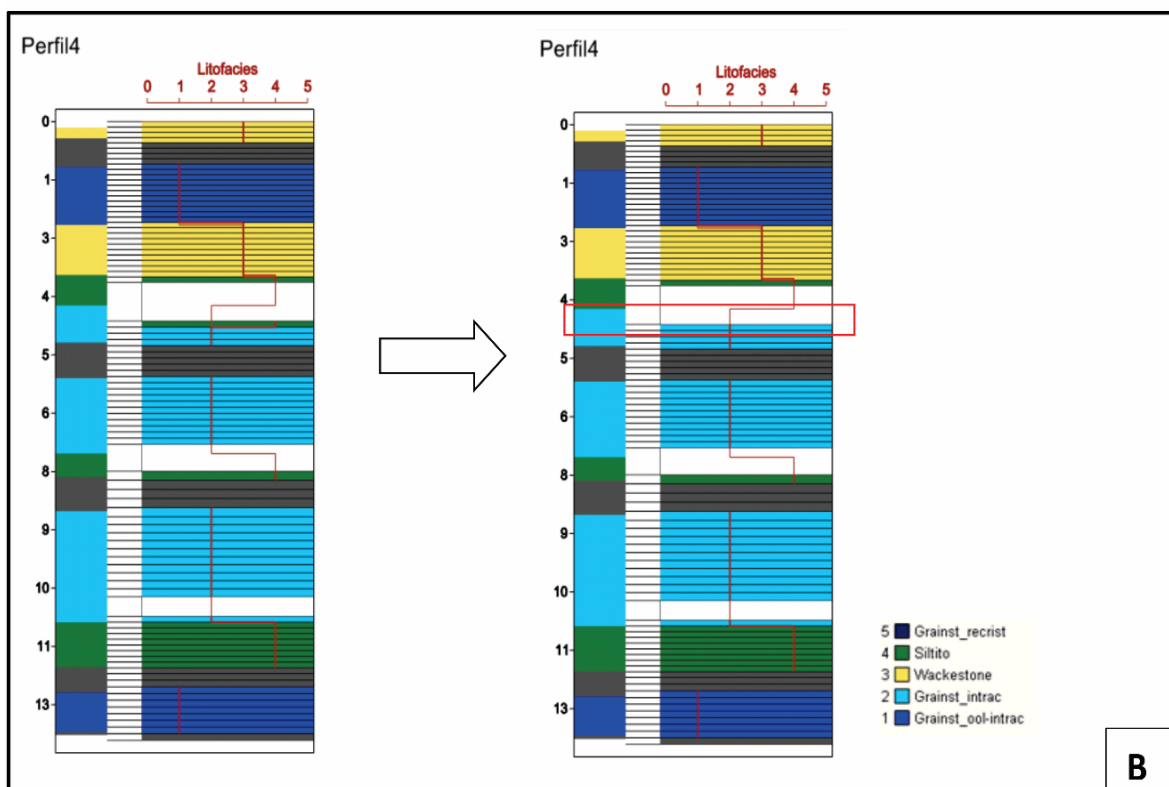
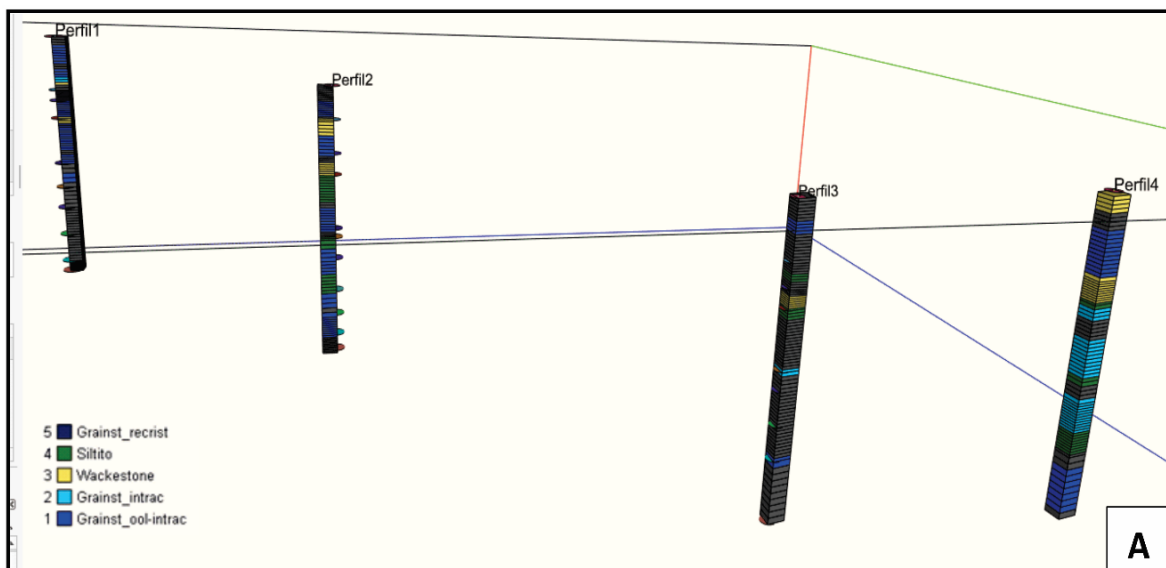


Figura 35: Blocked wells criados para os perfis descritos na pedraira. Em A os blocked wells dispostos em 3D view. As cores em cinza escuro representam ausência de dados de microfácies nesses locais. Em B está representada a comparação dos blockeds gerados com o dado original. A coluna mais à esquerda representa o valor original a ser modelado, a coluna da direita representa o blocked well gerado, com edições pontuais necessárias apontadas no quadro vermelho.

5.2.5 Modelagem de Fácies

Os parâmetros utilizados para a modelagem de fácies basearam-se em observações de campo, atitudes e variações laterais de camadas. Foi observado um *trend* deposicional para sudeste, conforme as radarfácies do GPR e os dados de paleocorrentes.

A modelagem de fácies foi feita a partir do método *belts*, o qual é baseado em pixels e utiliza o algoritmo de simulação gaussiana truncada (TGSim) (White *et al.*, 2003), que é indicado para representar sistemas progradacionais e retrogradacionais que variam lateralmente como "faixas".

Para a distribuição das fácies utilizou-se o algoritmo "*Simulation*" em todas as zonas, exceto nas zonas 8 e 10, com variograma esférico de direção azimutal 135° e alcances de 100 m nas direções perpendicular e paralelo ao azimute. Estes valores foram utilizados porque estão de acordo com as medidas de paleocorrentes aferidas em campo e das interpretações das radarfácies no GPR. Nas zonas 8 e 10 foi necessário usar o algoritmo "*trend*" uma vez que nelas ocorre pouca variação microfaciológica.

O alcance de 100 m refere-se à tendência observada em campo, uma vez que foi estimado de acordo com a continuidade geral das camadas. Em escala centimétrica, as microfácies podem variar em muito menos que dezenas de metros, porém, as zonas que foram interpoladas apresentam uma continuidade que segue por toda a frente modelada da pedreira, que tem aproximadamente 120 m.

O método utilizado para modelar as microfácies da Pedreira GMD foi o *Proportions*, ou seja, método que considera a ocorrência da proporção de cada microfácies nos *blocked wells*. Isto significa que a distribuição a ser realizada pelo software deve considerar a distribuição definida e calibrada pelo usuário, que por sua vez, foi obtida depois de "*blocka*" os perfis com os dados originais inseridos.

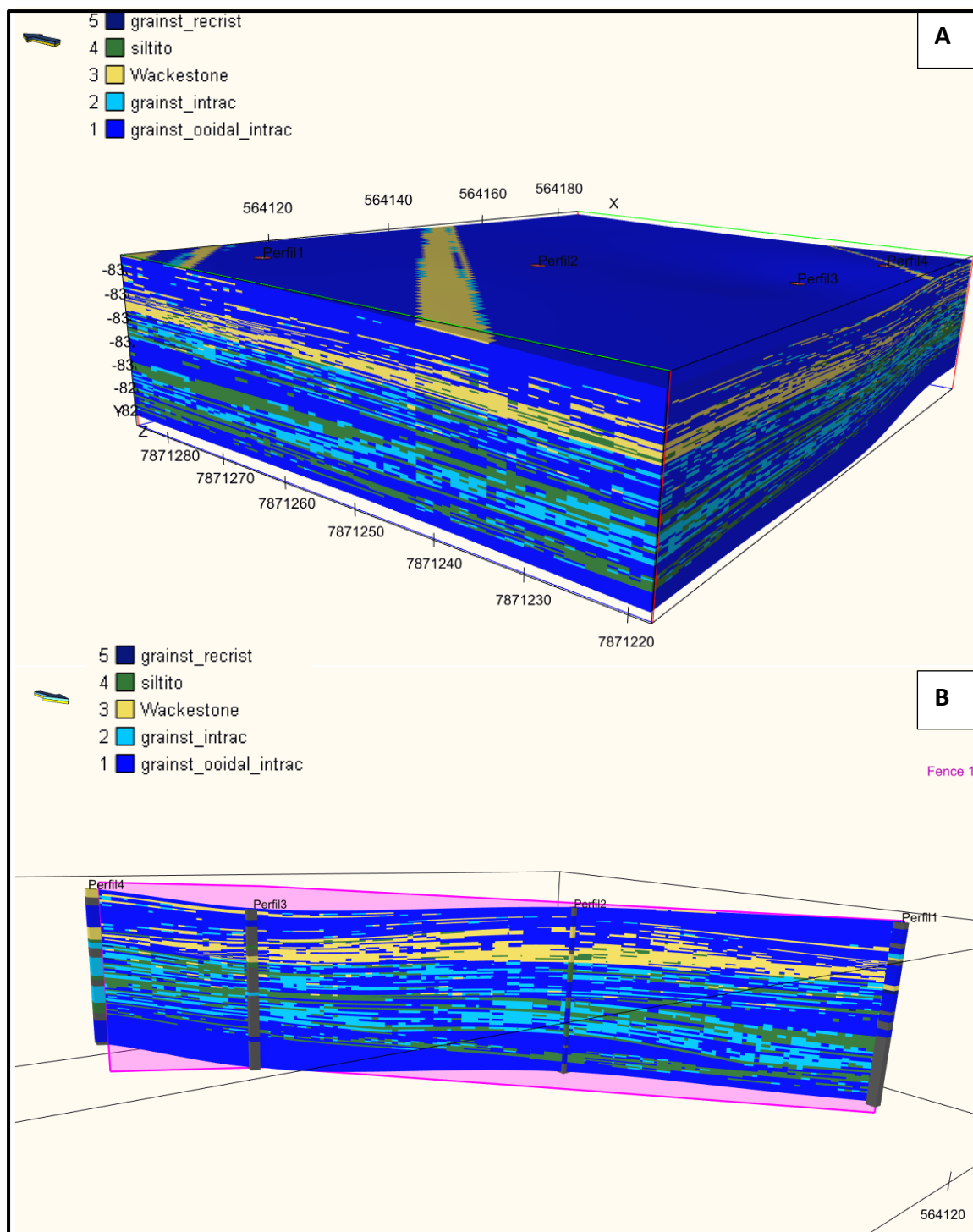


Figura 36: A) Bloco modelado da pedra com informações sobre a distribuição das microfácies na pedra GMD. B) Detalhe em Intersection View das fácies e horizontes modelados.

Terminada a modelagem, procede-se a etapa de controle de qualidade, que consiste em validar os dados obtidos pela modelagem com os dados imputados na etapa que gerou os *blocked wells*. Essa comparação é feita a partir de histogramas que o *software* gera. A figura 37 apresenta a comparação dos resultados obtidos pela modelagem da pedra GMD. Os dados em azul representam os dados interpolados na modelagem, ou seja, os dados que preencheram os pixels durante a interpolação. Já os dados em verde mostram o percentual de cada fácies gerado na etapa de “blockagem” dos perfis.

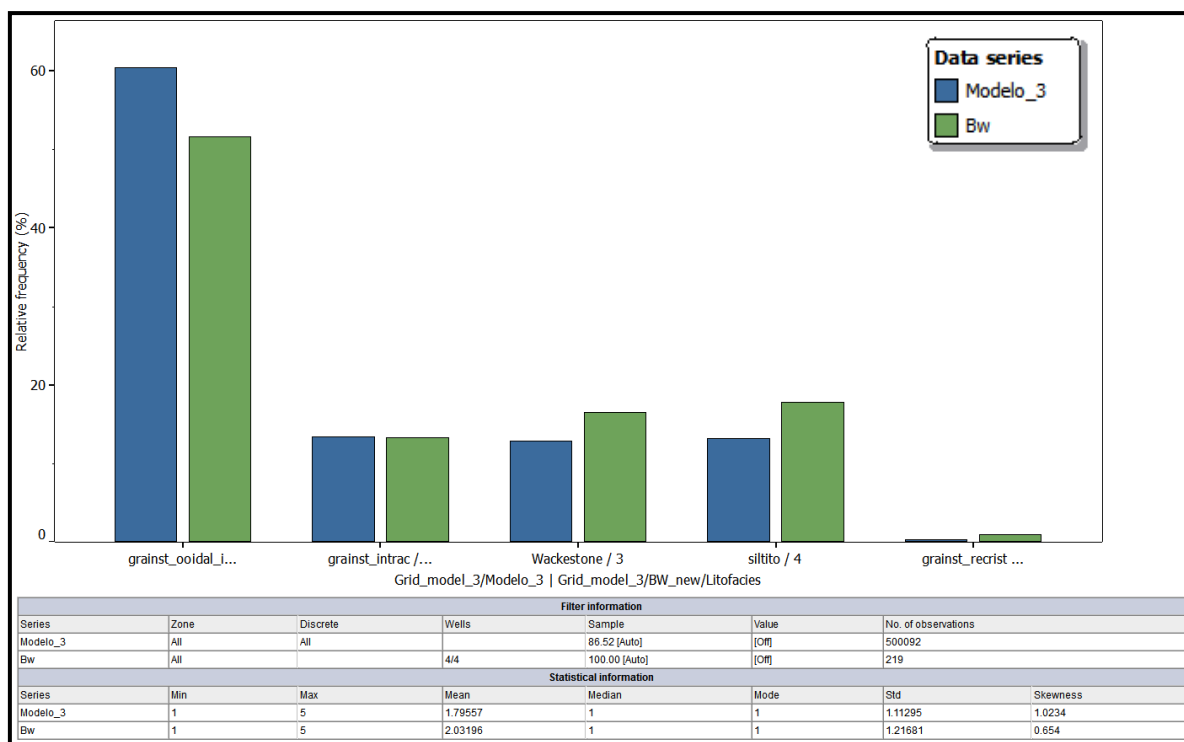


Figura 37: Histograma comparativo entre as proporções de fácies modeladas e fácies imputadas na etapa de criação dos *blocked wells*.

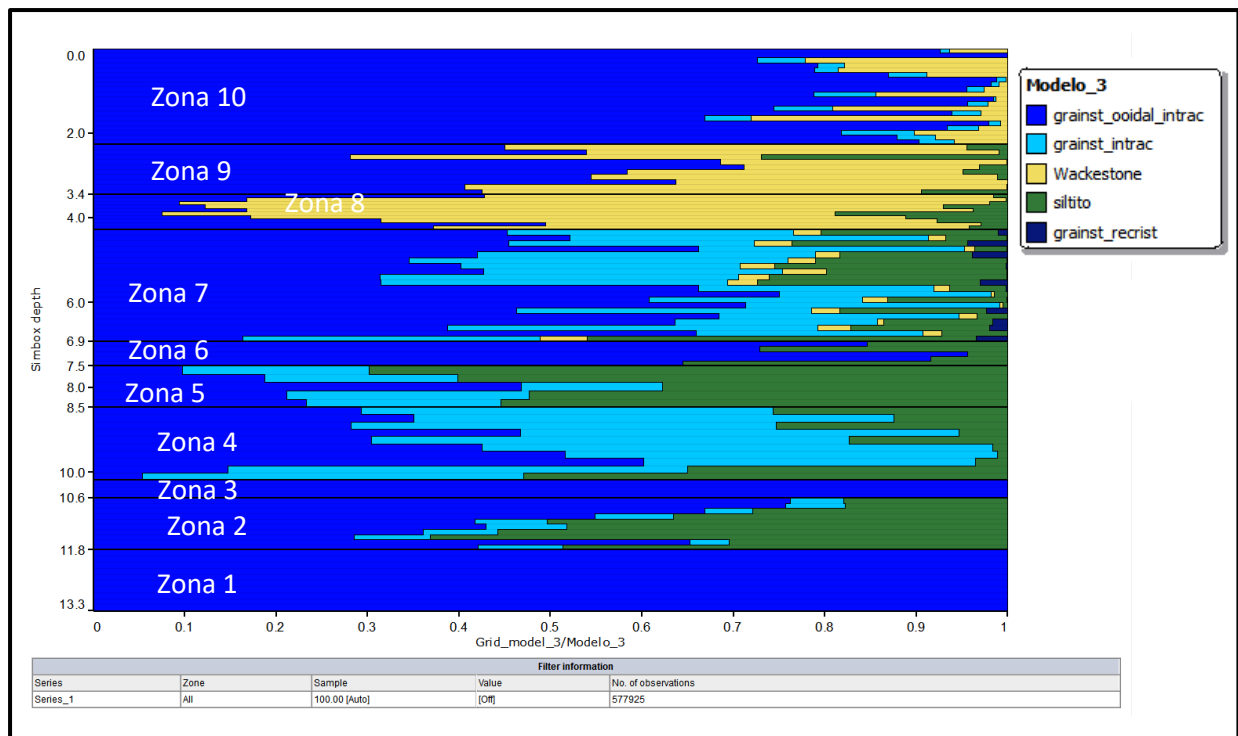


Figura 38: Proporção da distribuição das microfácies em todo o modelo em todas as zonas. A linha horizontal preta define cada zona

Observa-se que a proporção da microfácies de *grainstones* ooidais intraclásticos apresentou um incremento em relação àquela gerada pela “blockagem”. Isso se deve principalmente por essa ser a mais representativa dentre todas as microfácies mapeadas, com boa proporção em todos os perfis, bem como espessuras médias consideráveis de suas camadas. Diante disso, o software tende a dar um peso maior a essa unidade durante a interpolação dos dados, quando ocorrer uma inconsistência, ou quando houver um choque de dados de duas microfácies em um mesmo pixel (célula). De forma análoga, as microfácies de siltitos e *wackestones* são as menos representativas e pouca distribuição pelos perfis, logo tiveram o menor peso durante a interpolação dos dados.

Outro ponto que merece atenção é o fato de o modelo apresentar uma defasagem de dados imputados, uma vez que alguns perfis apresentam ausência de informação em relação às microfácies. O perfil 1 tem pouca amostragem em sua base, e o perfil 3 tem poucos dados de amostras-de-mão e lâminas. Essa falta de amostragem acabou sendo decisiva para tendência do

software popular as células vizinhas a esses perfis com os dados mais representativos.

Por fim, pode-se melhorar também o intervalo de pixelagem, uma vez que a representação dos dados das células não ocorreu de forma fluida e com boa resolução. Para tanto deve-se diminuir o tamanho das células de forma que as representações sejam mais precisas e realísticas.

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação de mestrado sintetiza dados relativos à sedimentação (descrição de fácies sedimentares, geometrias e arquiteturas deposicionais), petrografia macro e microscópica (microfácies carbonáticas) e tectônica rúptil de parte importante da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, na região de Paraopeba-MG. Os trabalhos foram desenvolvidos na pedreira GMD localizada a cerca de 100 km de Belo Horizonte. A aplicação dos diferentes métodos investigativos, e em diferentes escalas, conforme a metodologia CAMURES, permitiu avaliar variações litológicas, sucessão de fácies deposicionais, microfácies carbonáticas, arquiteturas deposicionais e características permo-porosas das rochas na pedreira GMD. As considerações e conclusões da dissertação são expostas a seguir.

As cinco litofácies descritas na pedreira representam calcarenitos médios a finos maciços, brechas intraclásticas, calcarenitos finos com marcas onduladas assimétricas, calcarenitos médios com estratificação *hummocky*, e por fim, calcilitos e siltitos.

A Formação Lagoa do Jacaré na área foi interpretada como depositada em ambiente plataformar marinho raso, sob influência de ondas de tempestade, uma vez que as arquiteturas deposicionais e as cinco litofácies descritas mostraram estruturas típicas desse ambiente de sedimentação. Dentre as feições observadas são citadas estratificações cruzadas *hummocky*, porções retrabalhadas na forma de calciruditos ricos em intraclastos pelíticos e calcilitíticos, estratificações onduladas e truncadas, marcas onduladas simétricas e assimétricas, além de discretos níveis pelíticos. Os dados de GPR auxiliaram nessa interpretação, permitindo o reconhecimento de geometrias que corroboraram as conclusões descritas acima.

Os trabalhos de descrição petrográfica revelaram a presença de seis microfácies em todas as amostras descritas: *grainstones* ooidais intraclásticos, *grainstones* intraclásticos, *grainstones* recristalizados, *wackestones* intraclásticos, siltitos e *mudstones*. Dentre estas, os *grainstones* ooidais intraclásticos foram os mais recorrentes, sendo descritos em todos os perfis da pedreira GMD, podendo isso ser indicativo de uma predominância de

sedimentação em regiões mais proximais (*shoal*). Complexos *shoal* representam extensos bancos arenosos e carbonáticos alongados proximais (*shoreface* proximal) onde ocorre grande deposição/precipitação de litologias com ooides associados. Diversos trabalhos foram desenvolvidos no sentido de examinar a sedimentação e petrografia desses complexos (Rankey e Reeder, 2011; Amour *et al.*, 2013; Pomar *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017).

Os dados de *gama-ray* auxiliaram na correlação lateral dos perfis descritos, bem como permitiram definir possíveis pulsos transgressivos de menor frequência em um contexto geral regressivo da unidade, conforme descrito na literatura. A interpretação desses dados permitiu a definição de dez zonas com assinaturas similares na pedreira GMD. Esse zoneamento foi primordial para o trabalho de modelagem geológica da pedreira descrito nesse volume.

O levantamento estrutural na pedreira mostrou a ocorrência de três famílias de fraturas principais, com direções gerais N-S, NE-SW e NW-SE, geralmente subverticalizadas, e que estão presentes cortando todo o afloramento.

A modelagem geológica integrou todos os dados levantados, e representou a distribuição das microfácies pela pedreira, confirmou a predominância das fácies ooidais no local, e corroborou com a ideia da predominância de deposição em ambiente plataformal proximal. Apesar da existência de alguns pontos a serem melhorados nesta etapa, a exemplo da “pixelagem” do modelo, o resultado alcançado pode ser considerado satisfatório nessa primeira abordagem. Em trabalhos futuros pode-se tentar a realização de um modelo tridimensional utilizando outras metodologias, como o método de Simulação Sequencial (SISim) a exemplo do que foi feito por Tomassetti *et al.* (2018), ou ainda com outros algoritmos disponíveis no *software* como o “*kriging*”, dependendo nesse caso de acesso a maior quantidade de dados ou perfis levantados.

A metodologia CAMURES, que foi aplicada nestes carbonatos neoproterozoicos, contempla dados até a escala petrofísica o que, posteriormente à construção do modelo deposicional e de fácies, permitiria a

concepção de um modelo de fluxo de hidrocarbonetos no reservatório carbonático. Contudo, como a análise petrográfica evidenciou baixa porosidade nas rochas da pedreira GMD, os trabalhos descritos nesse volume avançaram somente até a modelagem de fácies. A título de sugestão, pode-se posteriormente, em outros trabalhos, tentar avançar na análise petrofísica dessas rochas, talvez em outras fácies possivelmente mais porosas da unidade (estromatolíticas e microbiais, por exemplo), e quantificar as porosidades primária e secundária das mesmas, ainda que essas rochas não possam ser consideradas reservatórios convencionais de hidrocarbonetos.

Os dados levantados nesse trabalho apontam para uma concepção das rochas da Formação Lagoa do Jacaré como reservatórios fraturados não-convencionais, conforme proposto por Reis (2018), uma vez que existem sistemas de fraturas regionais recorrentes, além de escassa porosidade primária nessas rochas retrabalhadas e de maneira geral, muito bem cimentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adelu, A. O., Aderemi, A. A., Akanji, A. O., Sanuade, O. A., Kaka, S. I., Ofolabi, O., Olugbemiga, S., Oke, R., (2019). Application of 3D static modeling for optimal reservoir characterization. *Journal of African Earth Sciences*. 152: 184-196. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.02.014>.
- Alkmim, F.F., Brito-Neves, B.B., Castro Alves, J.A.1993. Arcabouço tectônico do Craton do São Francisco; uma revisão. *In: Domingues, J.M.L. & Misi, A. (eds). O Craton do São Francisco. SBG/SGM/CNPq, Salvador, p. 45-62.*
- Alkmim, F.F.; Martins-Neto, M.A. (2001). A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. *In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A. (2001). Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. SBG, Belo Horizonte: 9-30.*
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A. (2012). Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*. 33 (1): 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>.
- Almeida F.F.M. (1977). O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4):349-364.
- Alvarenga, C.J.S., Santos, R.V., Vieira, L.C., Lima, B.A.F., Mancini, L.H. (2014). Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. *Precambrian Research* 251: 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.06.011>.
- Amour, F., Mutti, M., Christ, N., Immenhauser, A., Agar, S. M., Benson, G. S., Tomás, S., Always, R., Kabir, L., (2011). Capturing and modelling metre-scale spatial facies heterogeneity in a Jurassic ramp setting (Central High Atlas, Morocco). *Sedimentology*. 59, 1158-1189. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01299.x>.
- Amour, F., Mutti, M., Christ, N., Immenhauser, A., Benson, G.S., Agar, S.M., Tomás, S., Kabir, L. (2013). Outcrop analog for an oolitic carbonate ramp reservoir: a scaledependent geologic modeling approach based on stratigraphic hierarchy. *AAPG Bull.* 97: 845-871. <http://doi.org/10.1306/10231212039>
- Annan, A. P. (2002). GPR—History, trends, and future developments. *Subsurface sensing technologies and applications*, 3(4): 253-270.

- Azevedo, R. L. M. Gomide J., Viviers M.C. 1987. Geohistória da Bacia de Campos: do Albiano ao Maastrichtiano. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(2): 139-146.
- Babinski M., Kaufman A. J., (2003). First direct dating of a Neoproterozoic post-glacial cap carbonate. In: South American Symposium on isotope Geology, 4, 2003, Salvador. Short Papers, p. 321-323.
- Babinski, M., Vieira, L. C., & Trindade, R. I. (2007). Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova*, 19(6): 401-406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>.
- Babinski, M., Pedrosa-Soares, A. C., Trindade, R. I. F. D., Martins, M., Noce, C. M., & Liu, D. (2012). Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: Age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research*, 21(2-3): 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.008>.
- Barbosa, O. (1965). Série Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 19, Rio de Janeiro, *Anais...*, 15 p.
- Barnaby, R. J., Ward, W. B. (2007). Outcrop analog for mixed siliciclastic-carbonate ramp reservoirs: Stratigraphic hierarchy, facies architecture, and geologic heterogeneity— Grayburg Formation, Permian Basin, U.S.A.: *Journal of Sedimentary Research*, 77: 34–58. <http://doi.org/10.2110/jsr.2007.007>.
- Basso, M., Kuroda, M. C., Vidal, A. C. (2017). Análise geológica e petrofísica de um bloco de travertino como análogo de reservatório de hidrocarbonetos. *Geologia USP. Série Científica*, 17(2): 211-221. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-337>.
- Bonhomme, M.G. 1976. Minéralogie dès frations fines et datation rubidium-strontium dans le Groupe Bambuí, MG, Brésil. *Rev.Bras. Geoc.*, 6(4): 211-222.
- Borges, A.J., Drews, M.G.P., (2001). *Características magnetométricas da Bacia do São Francisco em Minas Gerais*. In: Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. (Eds.), *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG) - Núcleo MG, Belo Horizonte, pp. 55–66.
- Braun, O.P.G. (1968). Contribuição à estratigrafia do Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, *Anais...*, Belo Horizonte, SBG., p 154-166.
- Caers, J. (2005). *Petroleum Geostatistics*. Society of Petroleum Engineers. 88p.

- Caers, J. (2011). *Modeling Uncertainty in the Earth Sciences*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 248 p.
- Campos-Neto, O. P. A., Lima, W. S., Cruz, F. E. G. (2007). Bacia de Sergipe-Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobras*. 15(2): 405-415.
- Castro, P.T.A. & Dardenne, M.A. (2000). The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the Southwestern domain of the São Francisco Craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. 30(3): 439-441.
- Caxito, F. A., Halverson, G. P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T. G., & Uhlein, G. J. (2012). Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Research*, 200: 38-58. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.005>.
- Chen, L., Lu, Y., Fu, X., Xing, F., Wang, C., Luo, C. (2017). Oolitic shoal complexes characterization of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the Yuanba Gas Field, Northeast Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*. 83: 35-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.03.009>
- Chiavegatto, J.R.S. (1992). *Análise estratigráfica das seqüências tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco*. Dissertação (Mestrado). Dep. Geol., Escola de Minas, UFOP. 216 p.
- Choquette, P.W., Pray, L.C. (1970) Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 207-250.
- CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais & CPRM-Serv. Geol. do Brasil. (2014). Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais – Versão Atualizada. CPRM-CODEMIG, Belo Horizonte Escala 1:1.000.000.
- Colombera, L., Yan, N., McCormick-Cox, T., Mountney, N.P. (2018). Seismicdriven geocellular modeling of fluvial meander-belt reservoirs using a rule-based method, *Marine and Petroleum Geology* <http://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.03.042>.
- Costa, M.T., Branco, J.J.R. (1961). Roteiro para a excursão Belo Horizonte – Brasília. *In: SBG, Congr. Bras. Geol.*, 14, Belo Horizonte, *Anais*, 15: 1-119.
- Dantas, M. V. S. (2016). *Padrões Depositionais e Estratigráficos da Formação Riachuelo (Bacia de SE-AL) Sob a Ótica da Estratigrafia de Sequências*. Dissertação (mestrado). Salvador: Universidade Federal da Bahia. 122p.

- Dardenne, M. A. (1978). Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 30, pp. 597-610).
- Dardenne, M.A.(1981). Os Grupos Paranoá e Bambuí na Faixa dobrada Brasília. SBG, Na. Simp. Craton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, p. 140-157.
- Dardenne, M.A., (2000). The Brasília fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz-Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. 31st Internal Geological Congress, Rio de Janeiro, pp. 231–263.
- De Luca, P.H.V. e Basilici, G., (2008). O uso dos análogos na definição da arquitetura de reservatórios de rampa de água profunda: diferenças e semelhanças entre um sistema rico em pelito (unidade de Apiúna, Santa Catarina) e um sistema rico em areia (Formação Punta Negra, Pré-cordilheira Argentina). *Revista Brasileira de Geociências*, 38, 140-158.
- Della Fávera, J. C. (2001). *Fundamentos de Estratigrafia Moderna*. EdUERJ. 4ª edição. 263p.
- Derby, O.A. 1880. Contribuições para o estudo da geologia do vale do São Francisco. Rio de Janeiro. Arquivo Museu Nacional. 4: 89-119.
- Dunham, R.J. (1962) *Classification of Carbonate Rocks according to Depositional Texture*. American Association of Petroleum Geologists, 1, 108-121.
- Ellis, D. V., Singer, J. M. (2008). *Well Logging for Earth Scientists*. (2nd ed.). Springer, The Netherlands. 708p.
- Eschwege, W.L. von 1833. Pluto brasilienses. Traduzido por Murta, D.F. 1979. Belo Horizonte. Ed. Itatiaia. *Série Reconquista do Brasil*, disp. 2 vol, 528 p.
- Favoreto, J., Rohn, R., Lykawka, R., Okubo, J. (2016). Caracterização sedimentológica dos carbonatos albianos do reservatório Quissamã na porção meridional da Bacia de Campos. *Geociências*. 35(1): 1-15.
- Feboli W.L. (2008). Folha Pompeu, escala 1:100.000. CPRM- -Serv. Geol. do Brasil. CPRM-MME, Brasília.
- Félix, M. F. S., Santos, J. A. O., Oliveira, R. A. S., Menezes, L. S., Garcia, A. J. V. (2015). Modelagem geológica 3D aplicada intervalos com qualidades de reservatório da Formação Feliz Deserto, Bacia Sergipe-Alagoas. 1º Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Campina Grande – PB.

- Fernandez, R. O., Santos, A. J. (2017). Bacia de Santos: Sumário geológico e setores em oferta. 14^a rodada de licitações. ANP. http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round14/Mapas/sumarios/Sumario_Geologico_R14_Santos.pdf
- Ferreira, J. F. F., Candido, A. G., Rostirolla, S. P. (2010). Correlação Gamaespectrométrica de Afloramentos e Poços: Estudo de Caso na Formação Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*. 28(3): 371-396. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300005>.
- Ferreira, J. A. S. L. (2016). *Caracterização e modelação de reservatórios carbonatados: estudo de caso baseado em análogos do Jurássico Médio da região de Vale Florido, Maciço Calcário Estremenho (MCE)*. Dissertação (mestrado). Universidade de Lisboa. Portugal. 182p.
- Forte, E., Pipan, M. (2011). Reservoir Analogues Characterization by Means of GPR. In *EAGE/SEG Summer Research Workshop-Towards a Full Integration from Geosciences to Reservoir Simulation*. Trieste, Italy. <http://doi.org/10.3997/2214-4609.201402465>
- Forte, E., Pipan, M., Casabianca, D., Di Cuia, R., & Riva, A. (2012). Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.009>.
- Fragoso, D.G.C., (2011). Geologia da região de Presidente Olegário e evolução tectonosedimentar do Grupo Areado, Eocretácio da Bacia Sanfranciscana, Minas Gerais. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 134p.
- Freyberg, B. (1932). Ergebnisse Geologischer Forschung in Minas Gerais (Brasilien). *News Jahrb. Geol. Pal. Sand II*. Stuttgart.
- Fugita A.M. & Clark-Filho J.G. (2001). Recursos Energéticos da Bacia do São Francisco: Hidrocarbonetos líquidos e gasosos. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.). *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), p. 265-284.
- Garcia, A. J. V., Paim, P. S. G., Lopes, R. C., Faccini, U. F., & Lavina, E. L. C. (2003). Caracterização de Reservatórios: Uma Análise Integrada. In: Paim, P. S. G., Faccini, U. F., Netto, R. G. (eds). *Geometria, Arquitetura e Heterogeneidades de Corpos Sedimentares: Estudo de Casos*. São Leopoldo – RS. Pub. Do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale Rio dos Sinos. Editora Unisinos. p 26-37.

- Garcia, A. J. V., Ribeiro, D. M., Figueiredo, S. A. S., Dantas, M. V. S., Oliveira, I., Leite, K. A. S., & Garcia, G. G. (2015). *3D Modeling of Carbonate Reservoir Analogue Outcrops Using CAMURES Methodology, Sergipe/Alagoas Basin (SEAL), Northeastern Brazil*. In: AAPG Annual Convention and Exhibition. Denver, CO.
- Gauw, D. S. de, (2007). *Estudo integrado de análogo a reservatórios petrolíferos fluviais: caracterização, parametrização e modelagem tridimensional de depósitos recentes do Rio Assu. (Rio Grande do Norte/Brasil)*. Dissertação (mestrado). Natal: UFRN. 74p.
- Guimarães, M. M. (1994). *Caracterização geológica e geoestatística de reservatório carbonático da Bacia de Campos. Campinas: Tese (doutorado)*. UNICAMP. 147p.
- Hilbert, N. N. (2016). *Heterogeneidades em multiescala da Formação Marizal (Aptiano, Bacia do Tucano, BA) como análogo de reservatórios fluviais em bacias distensionais*. Dissertação (mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP. 165p.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., & Schrag, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *science*, 281(5381), 1342-1346. <http://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342>.
- Koehrer, B., M. Zeller, T. Aigner, M. Poepfelreiter, P. Milroy, H. Forke and S. Al-Kindi (2010). Facies and stratigraphic framework of a Khuff outcrop equivalent: Saiq and Mahil formations, Al Jabal al-Akhdar, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, v. 15, no. 2, p. 91-156.
- Kuchenbecker, M. (2011). *Químioestratigrafia e proveniência sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG) (Msc thesis) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, p. 91.
- Jung, A., Aigner, T. (2012). Carbonate geobodies: hierarchical classification and database – a new workflow for 3D reservoir modelling. *Journal of Petroleum Geology*, 35, 49-65. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-5457.2012.00518.x>.
- Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos*. Editora Unesp. Rio Claro – SP. 253p.

- Lima, O.N.B. (2005). *Grupo Bambuí: Estratigrafia regional no Alto rio são Francisco e geologia dos depósitos fosfáticos da Serra da Saudade-MG*. Dissertação de Mestrado. UFMG- Belo Horizonte. 142 p.
- Lima, R. O., Ramos, W. S., Correia, G. L., Santos, A. O., Garcia, A. J. V. (2015). *Simulação de injeção de água em modelos análogos de reservatórios da Bacia Sergipe-Alagoas*. I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Campina Grande – PB.
- Lima, R. S. (2017). *Imageamento e modelagem digital com GPR em microbialitos da fazenda Arrecife, Chapada Diamantina (BA), NE do Brasil*. Dissertação (mestrado). Natal: UFRN. 91p.
- Lima, R. S., Teixeira, W. L. E., Albuquerque, F. R., Lima-Filho, F. P. (2018). *Ground Penetrating Radar digital imaging and modeling of microbialites from the Salitre Formation, Northeast Brazil*. Geologia USP Série Científica. 18(2), 187-200. <http://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-146075>
- Lira, A. R. A (2004). *Caracterização em multiescala de análogos de reservatórios da formação Maceió (aptiano da Bacia de Alagoas), nas regiões de Japaratinga e Morros de Camaragibe-AL*. Tese (Doutorado). Recife: Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE. 184p.
- Lopes, T. V., Garcia, E. L. M., Murad, M. A., Pereira, P. A., Rocha, A. C., Falcão, F. O. L., Bezerra, F. H. R. (2017). *Modelagem hierárquica de análogos de reservatórios carbonáticos fraturados carstificados*. 38º Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE. Florianópolis.
- Martinez, M. I., 2007. *Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências - UFMG. 147p.
- Martins M., Teixeira L.B., Braun O.P.G. (1993). Bacia do São Francisco: uma fronteira exploratória na pesquisa de petróleo no Brasil. *In: 7º Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Anais...*, Bol. 12: 55-57.
- Martins M., Lemos V. B., (2007). Análise estratigráfica das sequências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):156-167. <http://doi.org/10.25249/0375-7536.200737S4156167>.

- Martins-Neto, M.A. & Alkmim, F.F. (2001). Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registros da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. *In: Pinto, C.P & Martins-Neto, M.A. A Bacia do São Francisco geologia e recursos minerais*. SBG. Belo Horizonte, p. 31-34.
- Martins-Neto, M.A., 2009. Sequence Stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 26, 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.001>
- Melani, L. H. (2015). *Caracterização petrofísica de reservatório carbonático*. Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências -. UNICAMP. 103p.
- Menezes, L. (2004). *Mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos: exemplos para depósitos fluviais da Unidade Açú-3-Bacia Potiguar*. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra - UFRN. 118p.
- Moreira, J. L. P., Madeira, C. V., Gil, J. A., Machado, M. A. P. (2007). Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobras*. 15(2): 531-549.
- Moreira, D.S., Uhlein, A., Dussin, I.A., Uhlein, G.J., Pimentel Misuzaki, A.M., A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102503>
- Ochie, K. I., Rotimi, O. J. (2018). *Geostatistics – Kriging and Co-kriging methods in reservoir characterization of hydrocarbon rock deposits*. In: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, Nigeria.
- Oliver, M. A., Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena* 113: 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>.
- Orellana, N., Caverro, J., Yemez, I., Singh, V. (2014). Influence of variograms in 3D Reservoir-modeling outcomes: An exemple. *The Leading Edge*. 33(8):890-902. <http://doi.org/10.1190/tle33080890.1>.
- Paim P. S. G.; Garcia A. J. V.; Faccini U. F.; Lavina E. L. C. (2003). Geoarq, uma abordagem integrada e aplicada da Geologia Sedimentar. *In: Paim, P. S. G., Faccini, U. F., Netto, R. G. (eds). Geometria, Arquitetura e Heterogeneidades de Corpos Sedimentares: Estudo de Casos*. São Leopoldo – RS. Pub. Do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale Rio dos Sinos. Editora Unisinos. p 16-25.

- Palermo, D., Aigner, T., Nardon, S., Blendinger, W. (2010). Three-dimensional facies modelling of carbonate sand bodies: outcrop analog study in an epicontinental basin (Triassic, southwest Germany). *AAPG Bulletin*, 94, 475-512. <http://doi.org/10.1306/08180908168>.
- Palermo, D., Aigner, T., Seyfang, B., Nardon, S. (2012). Reservoir properties and petrophysical modelling of carbonate sand bodies: outcrop analogue study in an epicontinental basin (Triassic, southwest Germany). In: Garland, J., Neilson, J. E., Laubach, S. E., Whidden, K. J. (eds). *Advances in Carbonate Exploration and Reservoir Analysis*. Geological Society, London, Special Publications, 370. <http://dx.doi.org/10.1144/SP370.6>.
- Parenti Couto J. G., Cordani V. G., Kawashita K., Iyer S. S., Moraes N. M. P. (1981) Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Rev. Brasil. Geociências*. 11(1), 5-16.
- Paula-Santos, G. M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano-Filho, S., Trindade, R. I., Pedrosa-Soares, A. C. (2015). New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 28(2): 702-720. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>.
- Paula-Santos, G. M., Caetano-Filho, S., Babinski, M., Trindade, R. I., Guacaneme, C. (2017). Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 42: 280-305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.012>.
- Passarella, C. A. (2012). Integração de dados de poços e métodos geoestatísticos para a modelagem geológica do Campo de Namorado. Dissertação (mestrado). Campinas – UNICAMP. 144 pg.
- Pinto C.P., Pinho J.M.M., Sousa H.A. de. (2001). Recursos minerais e energéticos da Bacia do São Francisco em Minas Gerais: uma abordagem regional. In: Pinto C.P. & Martins-Neto M.A. (eds.). *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), p. 139-160.
- Plint, A. G. (2010). Wave-and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. In: James, N. P., Dalrymple, R. W. (eds). *Facies Models 4*; Geological Association of Canada: p167-200.
- Pomar, L., Aurell, M., Badenas, B., Morsilli, M., Al-Awwad, S.F., 2015. Depositional model for a prograding oolitic wedge, Upper Jurassic, Iberian basin. *Marine and Petroleum Geology*. 67: 556-582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.05.025>

- Pyrzcz, M. J., Sech, R. P., Covault, J. A., Willis, B. J., Sylvester, Z., Sun, T. (2015). Stratigraphic rule-based reservoir modeling. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. 63(4): 287-303.
- Qui, L., Carr, T.R., Goldstein, R.H., (2007). Geostatistical three-dimensional modeling of oolite shoals, St. Louis Limestone; southwest Kansas. *AAPG Bulletin*, 91, 69–96. <http://doi.org/10.1306/08090605167>.
- Qiao, Z.F., Janson, X., Shen, A.J., Zheng, J.F., Zeng, H.L., Wang, X.F. (2016). Lithofacies, architecture, and reservoir heterogeneity of tidal-dominated platform marginal oolitic shoal: an analogue of oolitic reservoirs of Lower Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, SW China. *Marine and Petroleum Geology*. 76: 290-309. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.030>
- Rankey, E.C., Reeder, S.L., 2011. Holocene oolitic marine sand complexes of the Bahamas. *Journal of Sedimentary Research*. 81: 97-117. <https://doi.org/10.2110/jsr.2011.10>
- Reed, S. J. B. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology* (Cambridge: Cambridge University Press). Second Edition.
- Reis, C. S. (2013). *Geologia, sistemas deposicionais e estratigrafia isotópica do Grupo Bambuí na região de Santa Maria da Vitória, BA*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências - Universidade de Brasília. 97p.
- Reis H.L.S., Fonseca R.C.S., Nascimento T.C., Suss J.F., Prevatti L.D. (2013). Bacia do São Francisco, Brasil: desafios na exploração de hidrocarbonetos em sistemas pré-cambrianos. In: 17º Simpósio de Geologia de Minas Gerais e 13º Simpósio de Geologia do Sudeste. Juiz de Fora, Anais.
- Reis H. L. S.; Alkmim F.F. (2015). Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 66(4):711-731. <https://doi.org/10.016/j.marpetgeo.2015.07.013>.
- Reis H.L.S., Suss J.F. (2016). Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: An example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 339:83-103. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.004>
- Reis, H. L. S. (2018). Gás Natural. In: Pedrosa-Soares, A. C.; Voll, E.; Cunha, E. C. (eds). *Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais*. Belo Horizonte. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais – CODEMGE.

- Reyes-Pérez, Y. A. (2008). *Caracterização geométrica e parametrização de depósitos transicionais recentes e sua aplicação na modelagem de reservatório petrolíferos*. Tese (doutorado). Natal: UFRN. 133p.
- Rimann, E. (1917). *Kimberlita do Brasil*. Ouro Preto. Na. Esc. Minas, 15: 27-32.
- Rodrigues, Y. C. (2018). *Inunditos como análogos de reservatórios: um exemplo nos depósitos gonduânicos triássicos do Gráben Arroio Moirão, RS*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS. 72p.
- Selley R.C. (1998). *Elements of Petroleum Geology*, 2^a ed. San Diego, Academic Press, 470 p. ISBN: 13:9780126363708.
- Seer, H.J.; Moraes, L.C.; Fogaça, A.C.C. 1987. Faciologia e estruturação tectônica dos metassedimentos co diamictitos e jaspelitos a região de Lagoa Formosa, MG (Grupo Bambuí?). *In: SGC-MG, Simp. Geol. Minas Gerais, 4, Belo Horizonte, Boletim 9, p. 199-213*
- Sgarbi, G.N.C., Sgarbi, P.B. de A., Campos, J.E.G., Dardenne, M.A., Penha, U.C., 2001. Bacia Sanfranciscana: O registro Fanerozóico da Bacia do São Francisco. *In: Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. (Eds.), Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG)—Núcleo MG, Belo Horizonte, pp. 93–138.*
- Souza, I. S., Garcia, G. G., Silva, M. O., Rocha, L. L., Garcia, A. J. V., Dantas, M. V. S., Leita, K. A. S., Prado, R. P. S., Figueiredo, S. A. S. T. (2015). *Modelagem geológica 3D e simulação de fluxo de fluido em meio poroso de um afloramento pertencente à Formação Riachuelo – Bacia Sergipe/Alagoas análogo em reservatório da Formação Quissamã – Bacia de Campos*. 8^o Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. Curitiba.
- Tatum, D. I., Francke, J. (2012). Constructing hydrocarbon reservoir analogues of aeolian systems using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. 81: 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.014>.
- Toledo M.A.S., Zalan P.V., Carvalho M.D. (1998). Reservoir facies in the Proterozoic São Francisco Basin: Mid-continent of Brazil. *In: ABGP/AAPG International Conference and Exhibition. Rio de Janeiro, Abstracts, AAPG Search and Discovery Article 90933.*
- Tomassetti, L., Petrachini, P., Tripetta, F., Tomassi, A. (2018). Modeling lateral facies heterogeneity of an upper Oligocene carbonate ramp (Salento, southern Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 96, 254-270. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.06.004>

- Tonietto S.N. (2010). *Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozoicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB. 167p.
- Tuller M.P. (2009). Folha Sete Lagoas, esc. 1:100.000. CPRM-Serv. Geol. do Brasil- MME, Brasília.
- Tuller, M. P., Ribeiro, J. H., Signorelli, N., Féboli, W. L. (2009) Projeto Sete Lagoas - Abaeté: Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2010. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB.
- Uhlein, A., Baptista, M.C., Seer, I.J., Caxito, F.A., Uhlein, G.J., Dardenne, M.A., (2011). A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí: sistema deposicional de leque submarino em bacia de ante-país. *Geonomos* 19 (2), 163–172. <http://doi.org/10.18285/geonomos.v19i2.51>
- Uhlein, G.J., Carvalho, J.F.M.G., Uhlein, A., Caxito, F.A., Halverson, G.P., Sial, A.N., (2013). Estratigrafia e sedimentologia da Formação Carrancas, Grupo Bambuí, nas regiões de Belo Horizonte e Pitangui – MG. *Geonomos* 20 (2), 79–97. <http://doi.org/10.18285/geonomos.v2i20.250>
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Halverson, G.P., Stevenson, R., Caxito, F.A., Cox, G.M., Carvalho, J.F.M.G., (2016). The Carrancas Formation, Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. *Journal of. South. American. Earth Sciences*. 71, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.009>
- Uhlein, A.; Ersinzon, F.; Uhlein, G.J.; Alcântara, D.G. (2017a). Estratigrafia e sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço e grupos Bambuí e Macaúbas: roteiro de campo na Serra do Espinhaço Meridional (MG). *Terrae Didactica*, 13:244–257. <https://doi.org/10.20396/td.v13i3.8650963>
- Uhlein, G. J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G. P., Caxito, F. A., & Cox, G. M. (2017b). Early to Late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 299, 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.020>.
- Uhlein, G. J., Uhlein, A., Pereira, E., Caxito, F. A., Okubo, J., Warren, L. V., Sial, A. N. (2019). Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate-siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 517, 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.12.022>

- Ulbricht, H. H. G. J., Ulbricht, M. N. C., Ferreira, F. J. F., Alves, L. S., Guimarães G. B., Fruchting A. (2009). Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. *Geologia USP, Serie Científica*, São Paulo, 9(1): 33–53. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2009000100003>.
- Vieira, L.C., Trindade, R.I.F., Nogueira, A.C.R., Ader, M., (2007). Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus Geosciences* 339, 240–258. <http://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.003>.
- Warren, L. V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M. G., Poiré, D. G., Strikis, N. M., Anelli, L. E., Strikis, P. C. (2014). The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*.42(5): 391-394. <https://doi.org/10.1130/G35304.1>.
- White, C. D.; Novakovic, N.; Dutton, S. P.; Willis, B. J. (2003). A Geostatistical Model for Calcite Concretions in Sandstone. *Mathematical Geology*, 35(5): 549-575. <https://doi.org/10.1023/A:1026282602013>.
- Winter, W. R., Jahnert, R. J., França, A. B. (2007). Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobras*.15(2): 511-529.
- Zalán, P. V., Romeiro-Silva, P. C. (2007). Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*.15(2): 561-571.

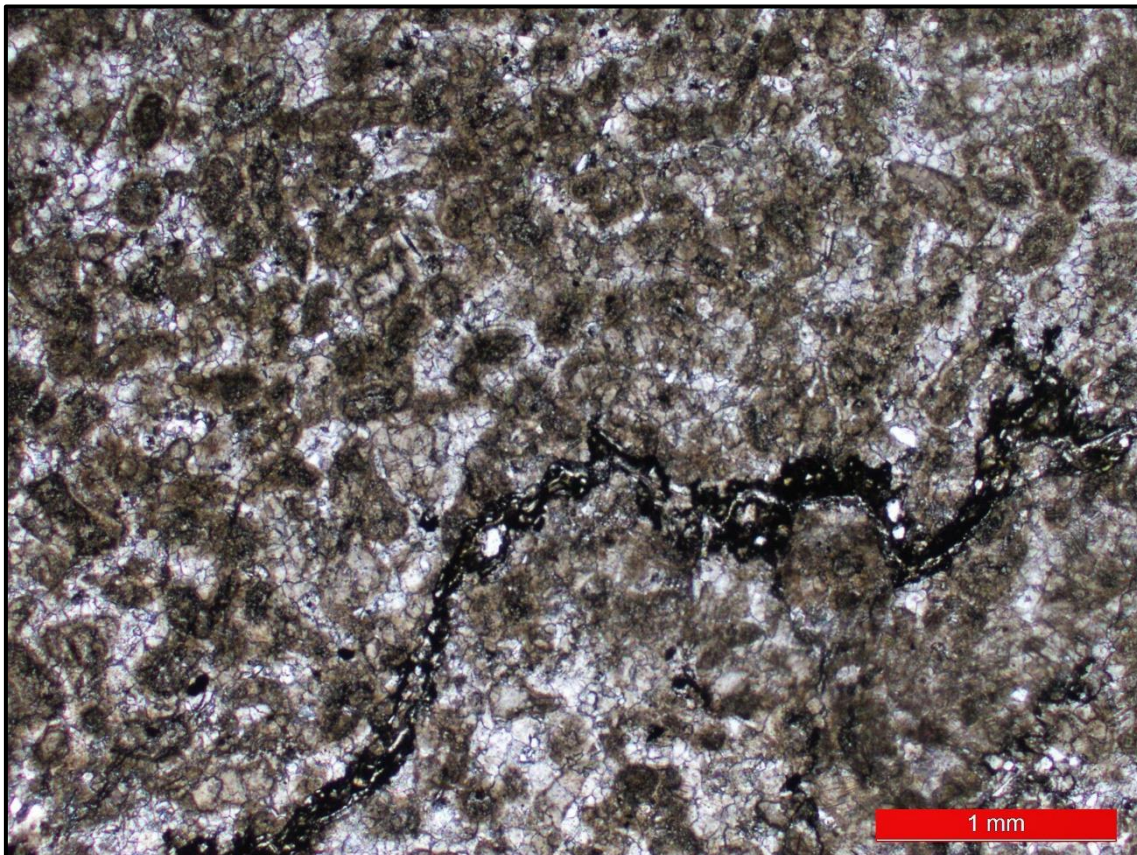
ANEXO I: DESCRIÇÃO DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS

Perfil 1

Lâmina G1.1: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Descrição: Rocha de granulometria areia muito fina a média, composta predominantemente por oóides (55%) em arcabouço aberto e cimento espático subordinado (40%). Ocorrem ainda quartzo e opacos dispersos (5%). Os grãos ooidais são em geral subarredondados a arredondados, e as vezes mostram vestígios de estrutura interna concêntrica. Observa-se que nos núcleos desses materiais, contem substituição por calcita espática. Os grãos apresentam piritização. O cimento é caracterizado como blocoso, muito bem definido, formando ângulos de 120° entre os cristais, e as vezes ocorre sobrecrecimento sintaxial. Apresenta estrutura estilolítica localizada.

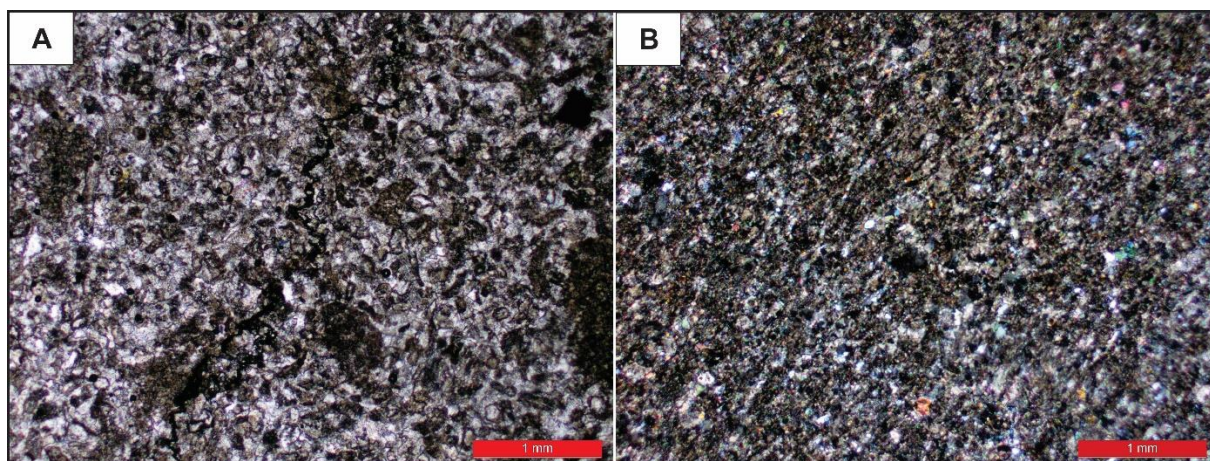
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G1.2: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha carbonática composta por intraclastos pelíticos, grãos ooidais (65%) de arcabouço aberto e mosaico de cimento espático blocoso (30%), com as bordas pouco definidas, de granulometria areia muito fina a média. Os intraclastos pelíticos, subangulosos, encontram-se muitas vezes piritizados. Os ooides, que em sua maioria mostram sobrecrecimento sintaxial do cimento, tem seu interior substituído por calcita espática. Apresenta ainda poucos grãos de quartzo, mica e opacos, compondo 5% da lâmina. A granulometria diminui em direção ao topo para silte, que indica uma estratificação gradacional no arranjo dos grãos ooidais e intraclásticos, que encontram-se orientados nessa mesma direção.

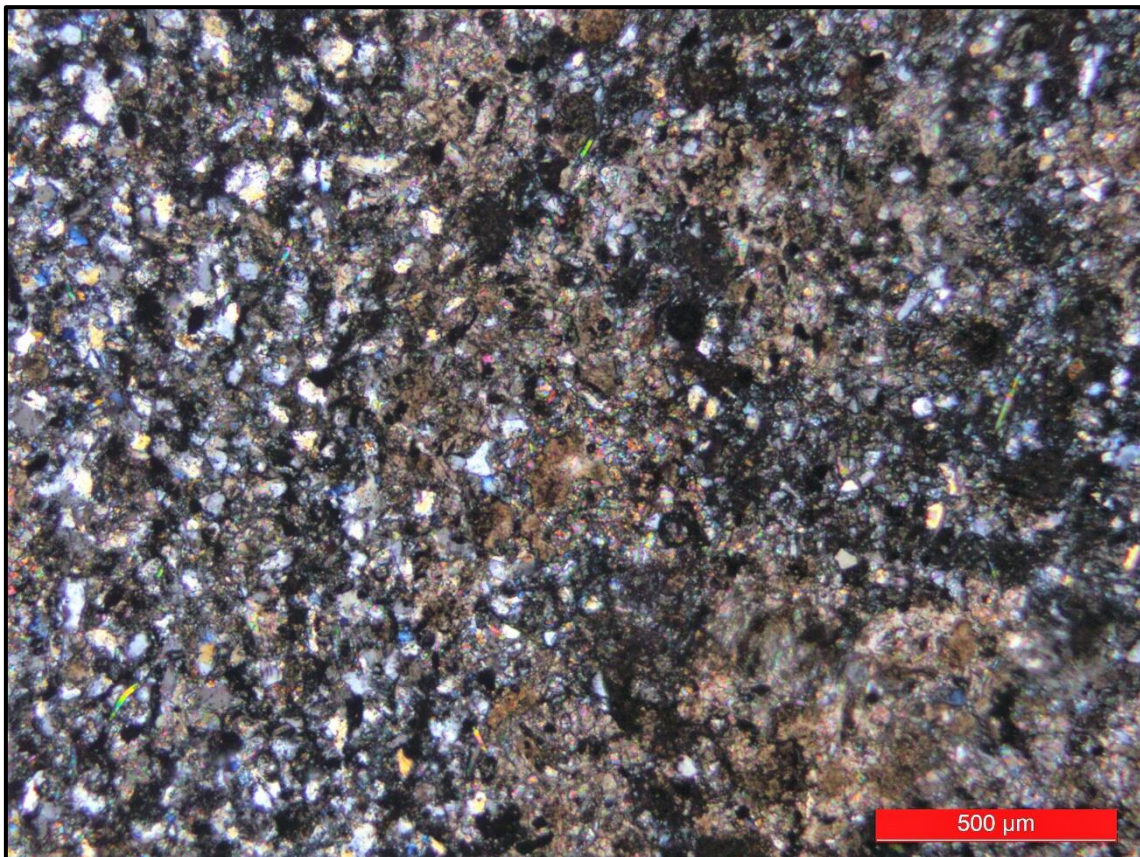
Fotos: A) Base da lâmina com granulometria mais grossa (Polarizadores paralelos) B) Topo da lâmina com granulometria mais fina (Polarizadores cruzados).



Lâmina G1.3: *Grainstone* Intraclástico

Rocha laminada, de granulometria silte grosso. Contém 70% de cimento/matriz carbonáticas, 10% de grãos de quartzo subangulosos, 10 a 15% de intraclastos pelíticos, concentrados em certas lâminas, orientados segundo o acamamento, 5% micas brancas, em sua maioria orientadas e opacos. Pode apresentar 10% de matriz de argilominerais, de cor amarronzada típica. Ocorrem níveis de opacos descontínuos, irregulares e ondulados. Há um contato abrupto com uma camada de siltito carbonático. Essa rocha é composta predominantemente por quartzo e feldspatos subangulosos a angulosos (70%), opacos (10%), micas detríticas (5%), clorita (5%) e matriz carbonática (10%). Finas lâminas concentradas em minerais opacos ocorrem, onde a clorita é mais presente.

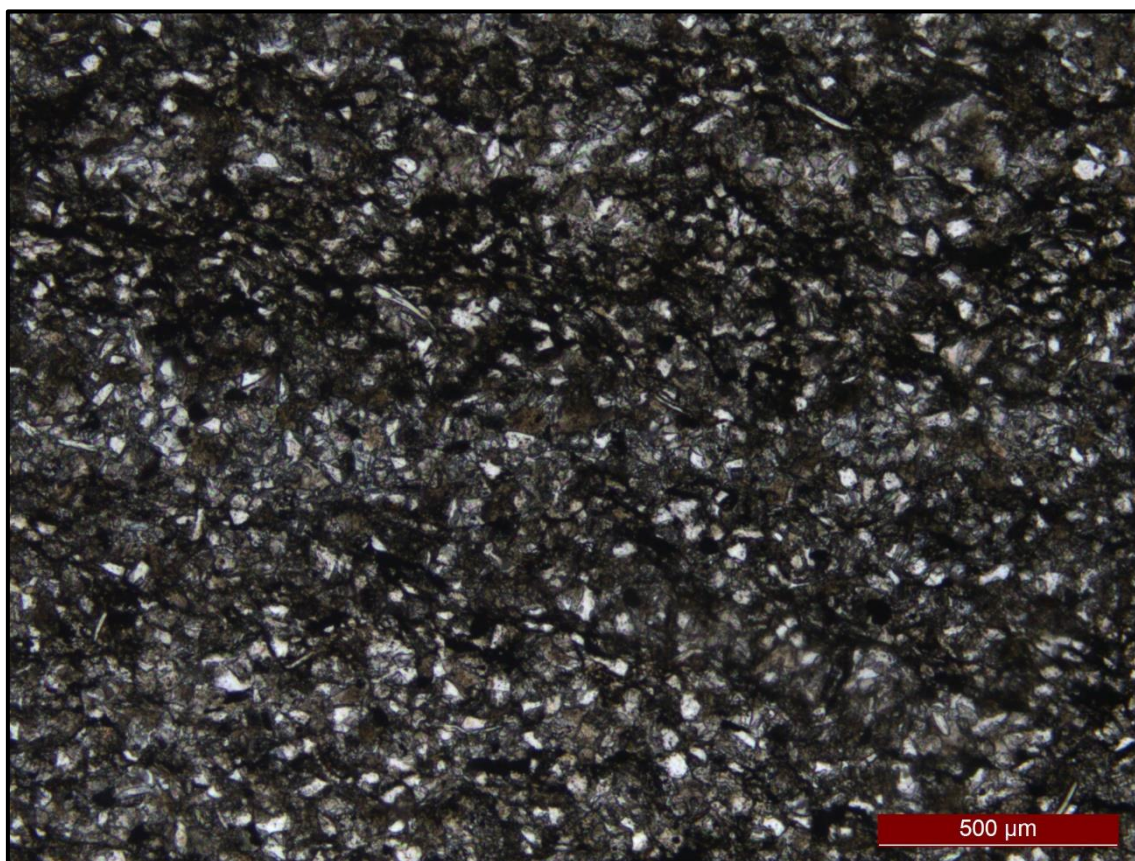
Foto: Visão geral da lâmina com matriz carbonática, grãos de quartzo e matriz de argilominerais amarronzada. Polarizadores cruzados.



Lâmina G1.4: *Wackestone* Intraclástico Laminado

Rocha carbonática muito laminada de granulometria silte grosso. O carbonato aparece como matriz micrítica e localmente também como calcita espática fina. A rocha apresenta também quartzo anguloso a subanguloso, intraclastos pelíticos, opacos, argilominerais cloritizados e, em menor quantidade, micas brancas detríticas e feldspatos. A rocha, por ser laminada, apresenta diferentes proporções de minerais em cada lâmina. Há lâminas mais carbonáticas (70%) e quartzosas (30%), enquanto há outras, originalmente argilosas, com mais intraclastos, clorita e opacos (50%), e carbonato e quartzo (50%). Apresenta lâminas finas concentradas de opacos com perturbações localizadas sugerindo dobras.

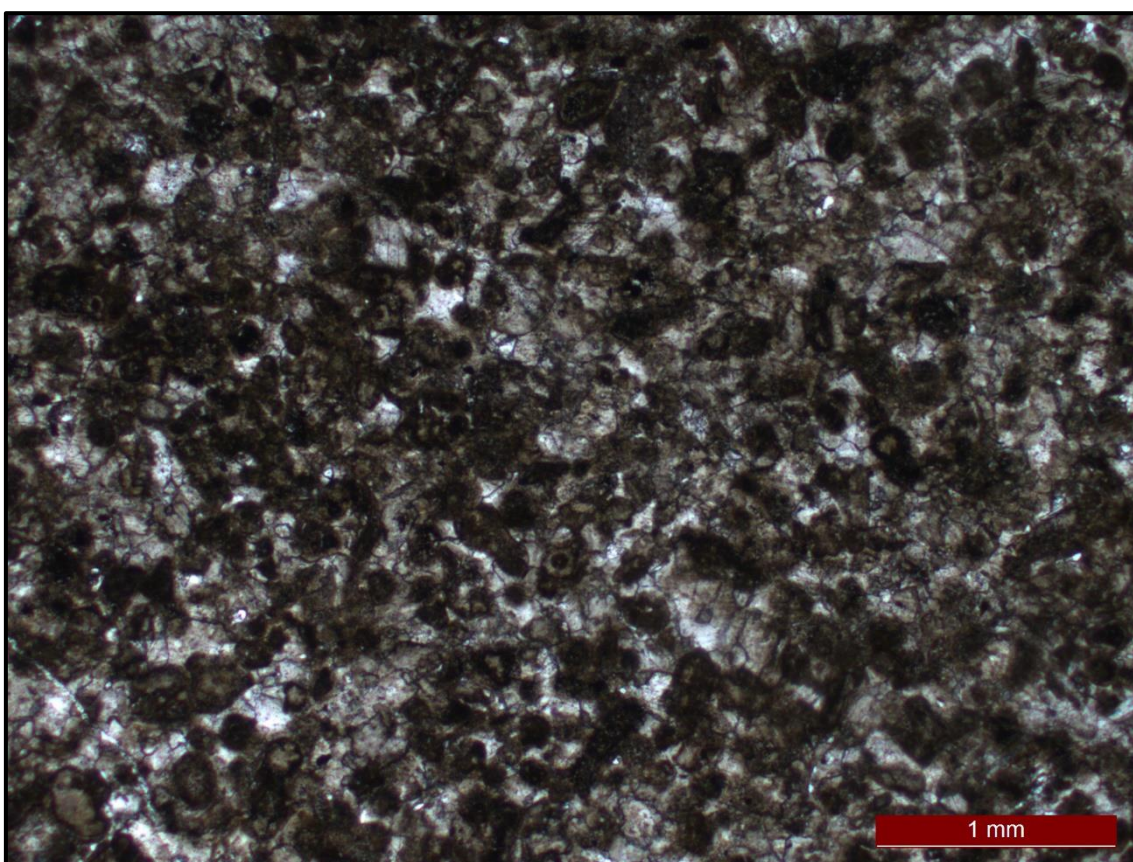
Foto: Visão geral da lâmina com alternância de porções carbonáticas e quartzosas. Polarizadores paralelos.



Lâmina G1.5: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha carbonática que varia de granulometria areia média a silte, rica em ooides, e intraclastos pelíticos. Esses grãos são predominantes na porção central e superior da rocha, de granulometria areia fina a média, compondo 70 a 80% da lâmina. Apresenta calcita espática bem definida (20 a 30%), generalizada, blocosa, as vezes substituindo o núcleo dos grãos ooidais. Os intraclastos muitas vezes encontram-se piritizados. Alguns grãos mostram sobrecrescimento sintaxial, evidenciando a recristalização diagenética. Quartzo e opacos ocorrem na lâmina em menor quantidade.

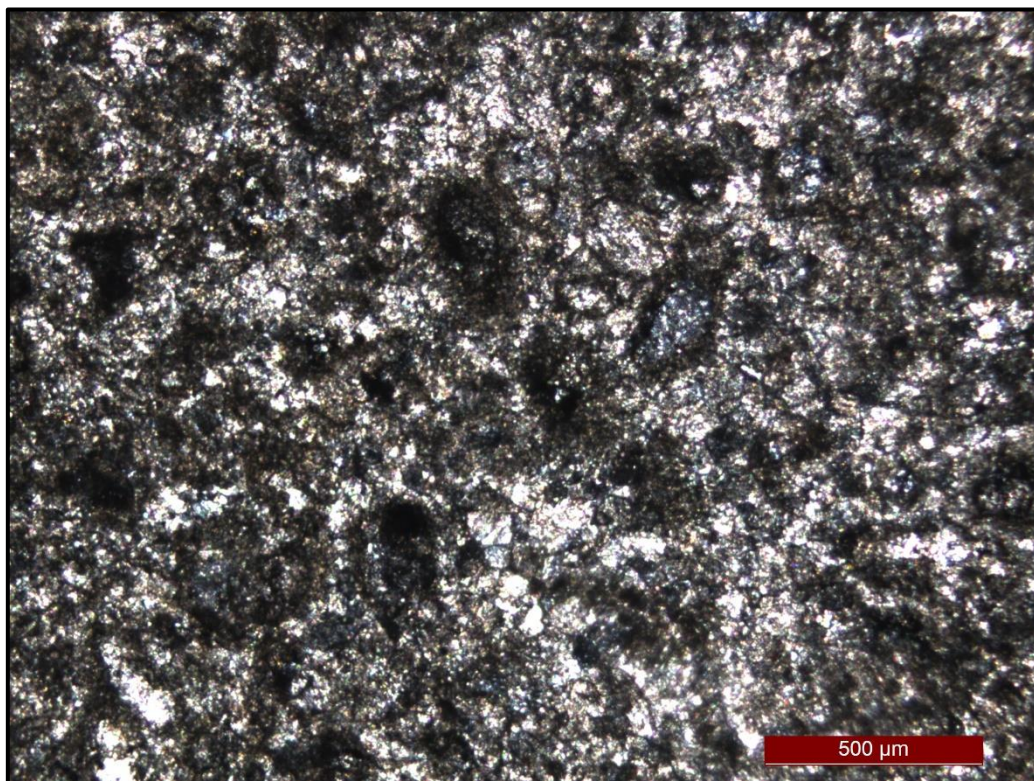
Foto: Intraclastos e ooides em contato com calcita espática. Polarizadores paralelos.



Lâmina 1.6: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha carbonática com granulometria areia fina a média, com predominância de grãos de oóides (40%), além de opacos (30%), cimento carbonático (20%), micas brancas (5%) e quartzo (5%). Os oóides apresentam-se em geral com núcleo interno pouco preservado e de difícil reconhecimento, talvez por apresentar processos de micritização e recristalização. Por vezes, alguns estão preenchidos por opacos e calcita espática. Dispersas pela lâmina, ocorrem finas laminações de minerais opacos, geralmente dobradas em padrão estilolítico. O cimento em geral é formado por calcita fina. Existem duas texturas diferentes na lâmina. Na base, apresenta-se mais recristalizada, com cimento espático e grãos bem definidos, em arcabouço aberto, de contatos flutuantes. Para o centro, grada para uma textura mais fina, micritizada, com opacos dispersos. No topo, os grãos estão em contato entre si, em uma massa de cimento espático de granulometria menor que a da base.

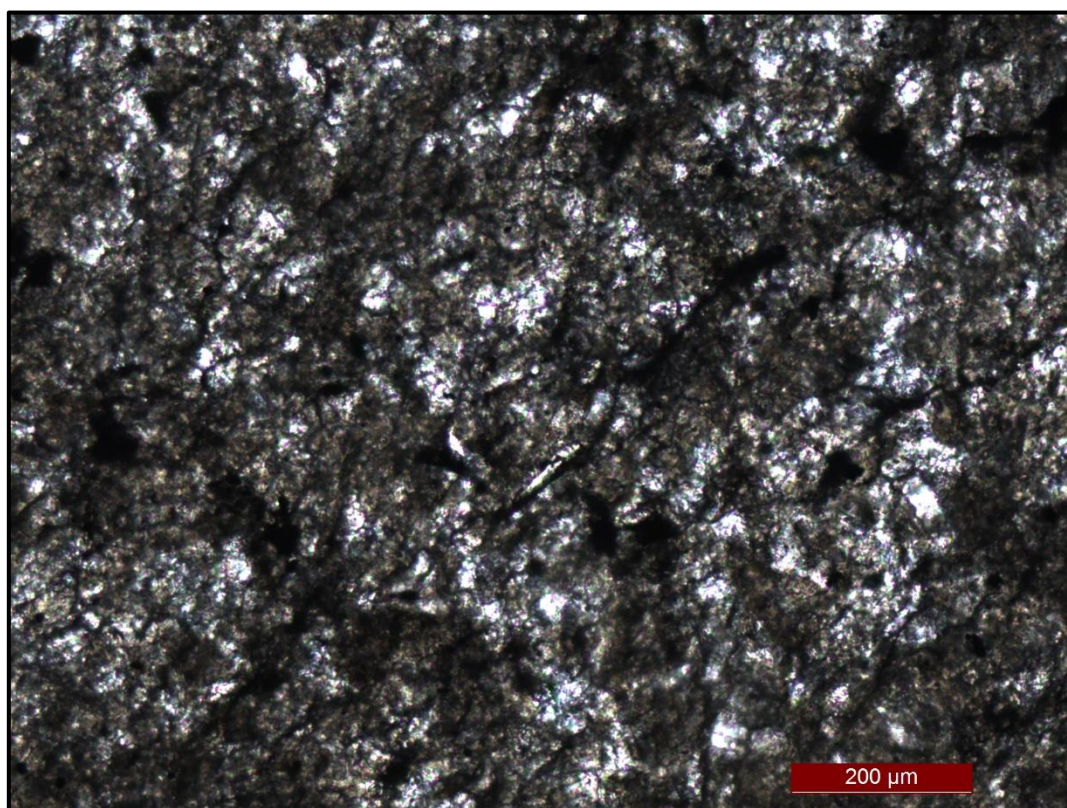
Foto: Presença de ooides e intraclastos associados a cimento espático. Polarizadores cruzados.



Lâmina 1.7: *Grainstone* Recristalizado

Rocha carbonática laminada, de granulometria muito fina a fina, com cimento espático, grãos siliciclásticos, opacos e resquícios de matriz micrítica. Também apresenta lâminas estilolíticas de opacos dispersos por toda a lâmina. Apresenta proporcionalmente carbonato espático (70%), mica branca orientada (~10%), opacos (~10%), quartzo (~5%) e epidoto (~5%). Ocorrem fenocristais de calcita espática piritizados localizados. Porosidade secundária é observada nas estruturas estilolíticas.

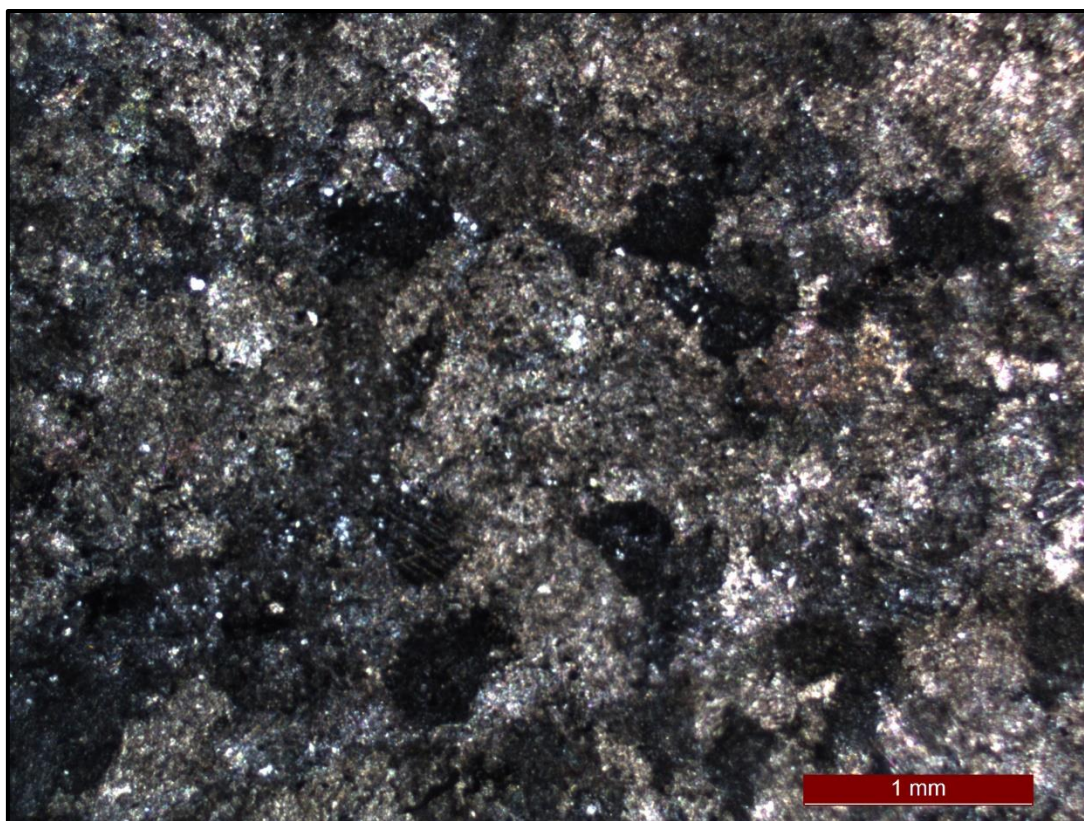
Foto:



Lâmina G1.8: *Grainstone* Recristalizado

Rocha carbonática fina a muito fina, laminada, com cimento (75%), apresentando opacos (20%) e poucas micas brancas (5%) dispersos. A rocha apresenta-se em finas lâminas, marcadas por variação granulométrica. Recristalização de grãos menores. Pôde-se observar ainda, finas lâminas de opacos, formando pequenas dobras estilolíticas, bem como processo de piritização em cristais calcícticos reliquiares. Observou-se o mineral epidoto como acessório. Porosidade marcada por resina azul extremamente baixa. Localmente, na base da lâmina, observa-se fácies de *grainstone* ooidal muito recristalizado com calcita espática mais grossa que a presente no restante da rocha.

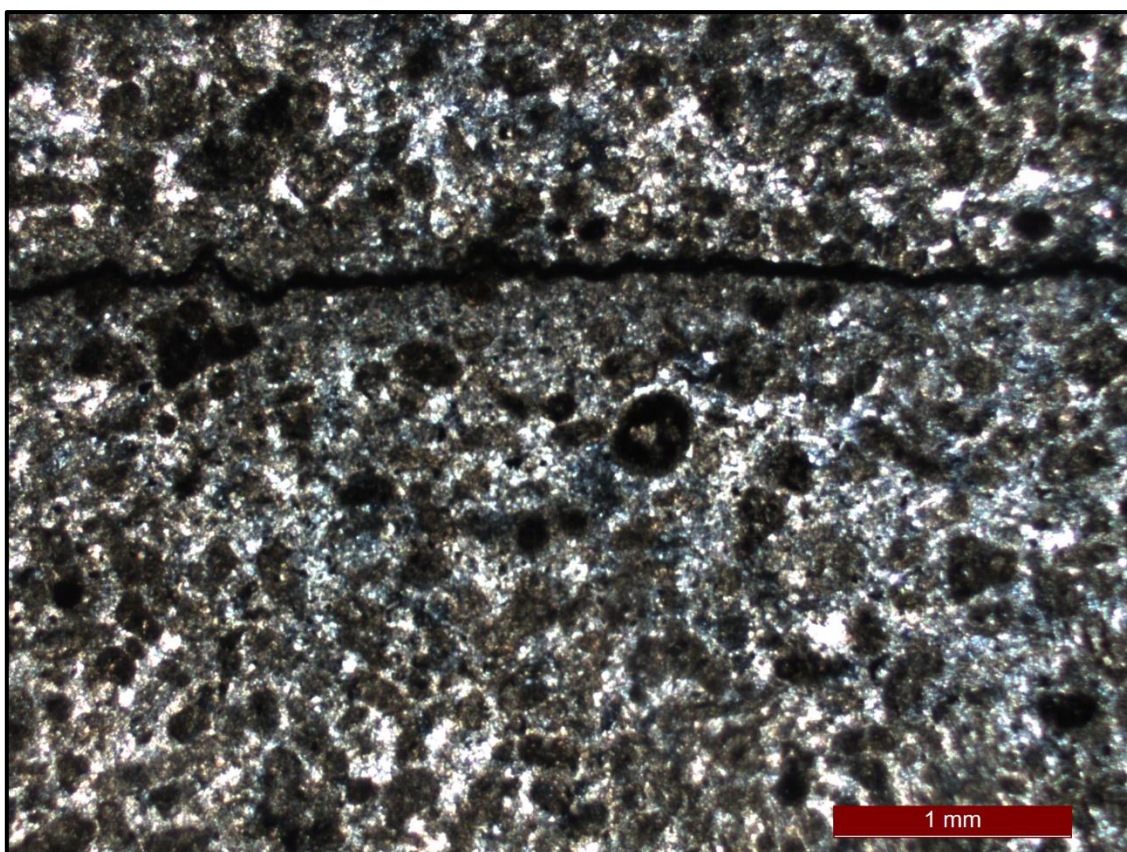
Foto: Polarizadores cruzados.



Lâmina G1.9: *Grainstone* ooidal intraclástico

A lâmina apresenta ooides (30%), grãos de intraclastos angulosos a subangulosos de granulometria até seixo (20%) e cimento carbonático (30%) blocoso a granular, de granulometria fina. Os oóides em geral apresentam pouca preservação de seu núcleo e estruturas internas, sendo normalmente preenchidos por calcita espática ou grãos de minerais opacos, apresentando-se em cor marrom escuro e estão em contato flutuante a pontual. Ocorrem ainda injeções de calcita espática grossa que corta a sequência na forma de possíveis veios ou lentes. Um intraclasto de *mudstone* se destaca por apresentar entre 1 e 2 cm. Em direção ao topo, a lâmina se torna mais recristalizada, com cimento espático mais grosso que na base. No topo da lâmina, ocorre contato do *grainstone* com uma camada muito foliada/laminada, com presença de quartzo, paletas de mica branca e carbonato, com lâminas de opacos bem marcadas onde também observa-se porosidade secundária, acompanhando esses planos.

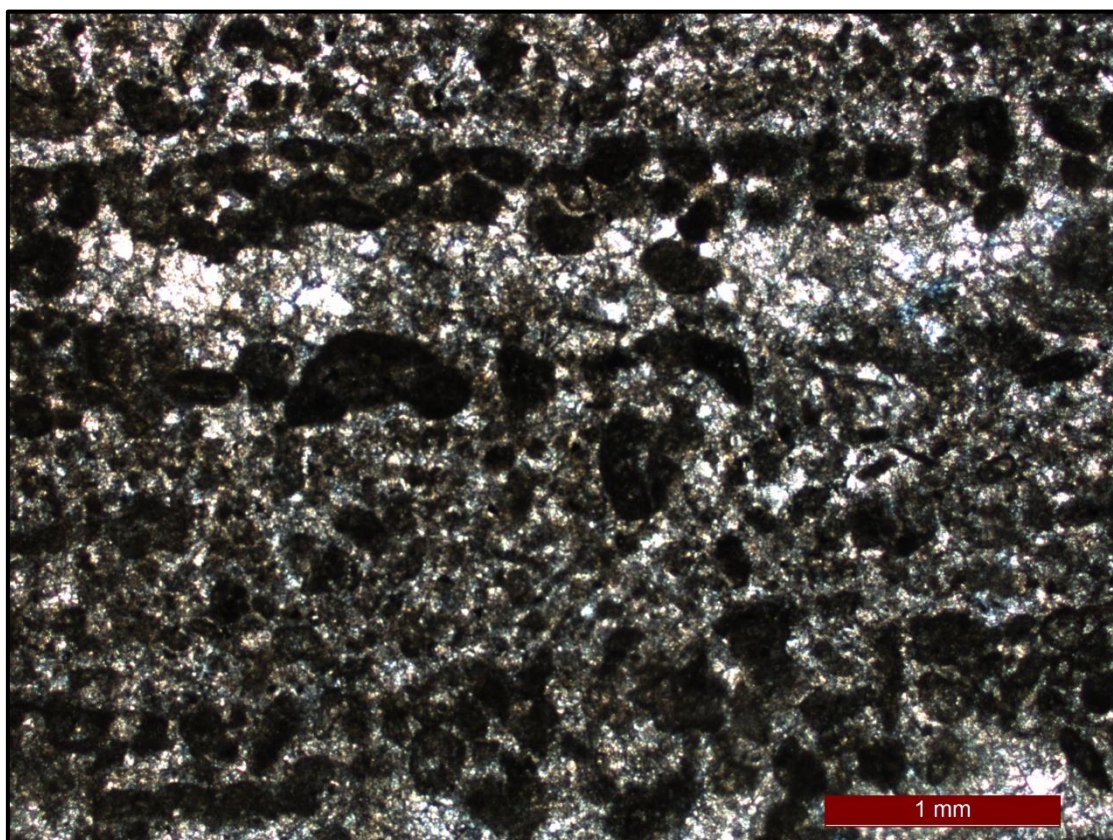
Foto: Intraclastos e ooides com presença de cimento espático. Polarizadores cruzados.



Lâmina G1.10: *Grainstone* ooidal intraclástico

Rocha carbonática laminada, apresentando predominantemente material ooidal e intraclástico cimentado por carbonato blocoso. Os intraclastos encontram-se angulosos a subangulosos, alongados acompanhando o acamamento, enquanto os ooides são geralmente arredondados e por vezes alongados. Intercalando essa sequência, ocorre lâmina carbonática cristalina, com grãos recristalizados, calcíticos, bem formados e com presença de minerais opacos dispersos, além de lentes de *mudstone*, com pequenas ripas de mica branca, e também com opacos dispersos. Associado a esse *mudstone* podem ocorrer finas laminações de minerais opacos formando dobras estilólíticas, provavelmente aproveitando o plano de descontinuidade. No topo da lâmina, ocorre uma porção com maior teor de quartzo, com laminação de opacos proeminente, além de acessórios como epidoto e pequenas ripas de micas.

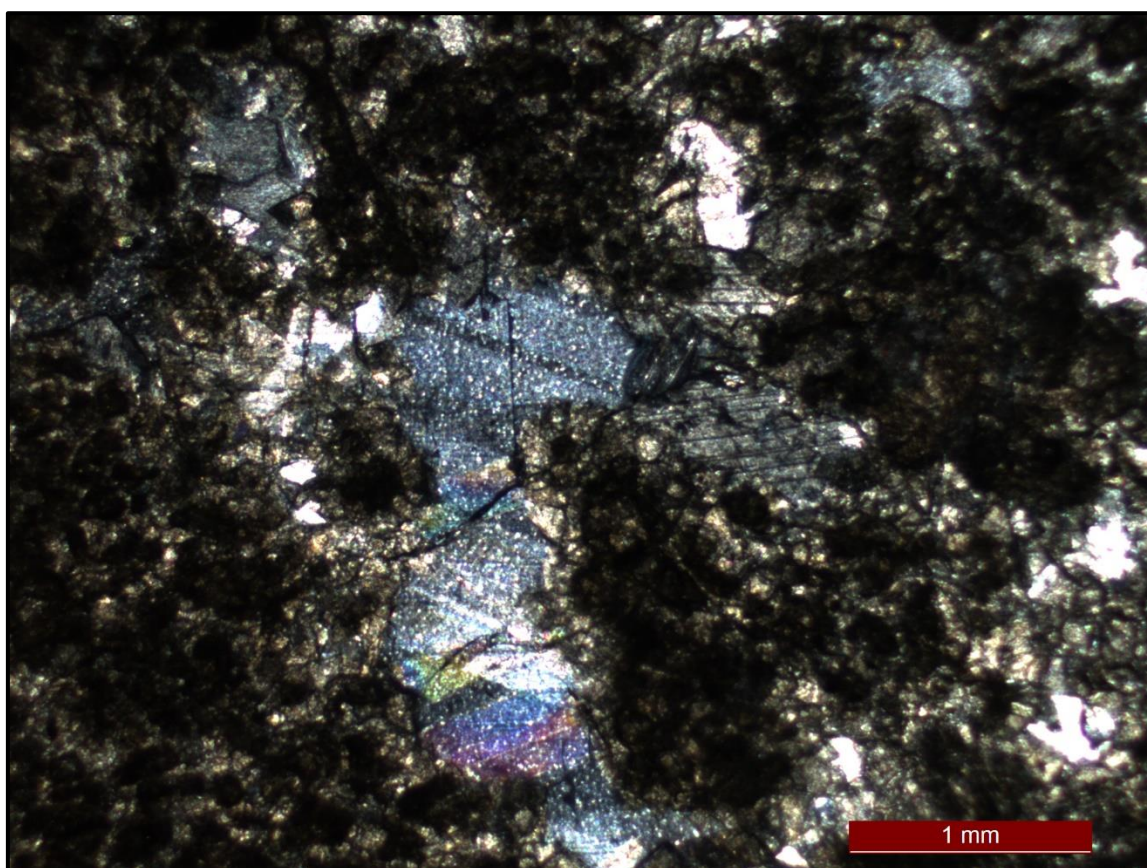
Foto: Polarizadores Paralelos.



Lâmina G1.11: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha de granulometria grossa, composta predominantemente por ooides (50%) e intraclastos (podem chegar a até 2cm) (30%), que às vezes encontram-se piritizados, e cimento espático blocoso (20%). Também são observados minerais opacos dispersos pela lâmina e lentes de *mudstone*. Apresenta finos níveis estilolíticos compostos de mineral opaco e veios de calcita grossos que preenchem planos de fratura e/ou dissolução, tornando a lâmina muito pobre em poros.

Foto: Grãos ooidais e intraclastos dispersos, com detalhe para veio calcítico grosso. Polarizadores cruzados.

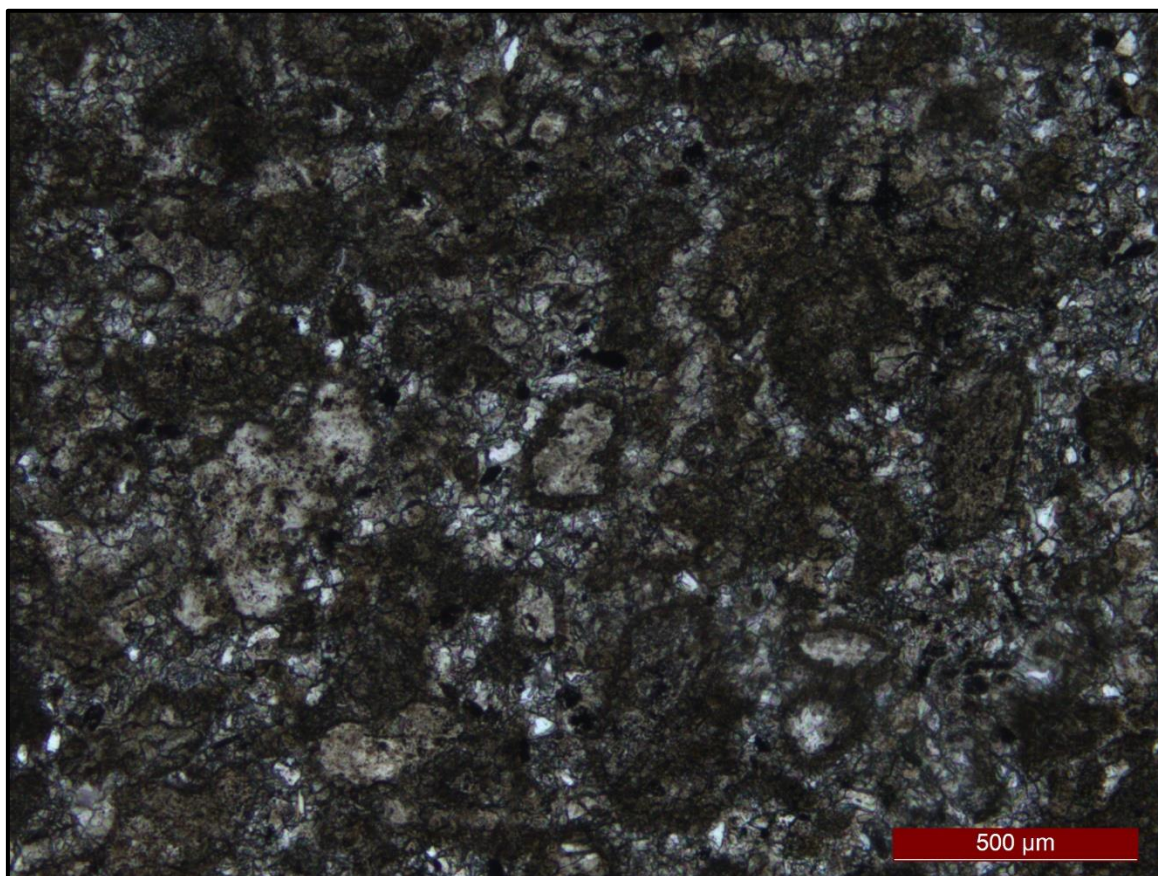


PERFIL 4

Lâmina G4.3: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha carbonática laminada, apresentando predomínio de estruturas ooidais (60%), de granulometria areia fina. Esses grãos são subarredondados a arredondados, com núcleo geralmente substituído por calcita espática, de maneira semelhante ao material intergranular. Mosaicos de cimentação de calcita espática blocosa ocorrem em 35% da lâmina. Localmente ocorrem intraclastos pelíticos mais ou menos piritizados alongados e subangulosos. Pequenos grãos de quartzo e materiais opacos ocorrem dispersos em toda a lâmina (5%).

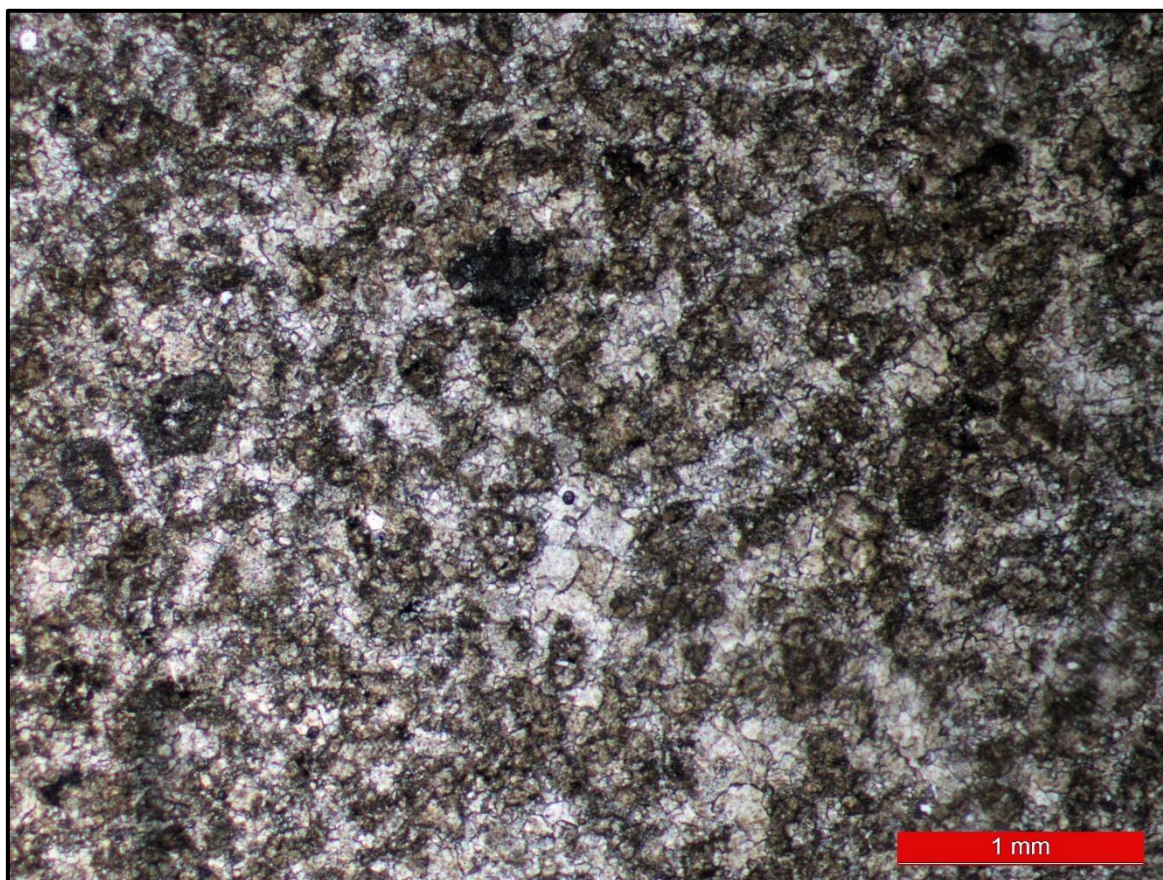
Foto: Polarizadores Paralelos



Lâmina G4.4: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Calcário de granulometria areia média, contendo mosaico de cimento espático blocoso em grande quantidade (50%). Na base, intraclastos e ooides residuais são observados, o último com núcleos substituídos por calcita espática. No topo apresenta apenas calcita cristalina sem presença de ooides ou intraclastos. Suas bordas são difusas, com limites pouco nítidos, provavelmente devido à forte recristalização da calcita espática.

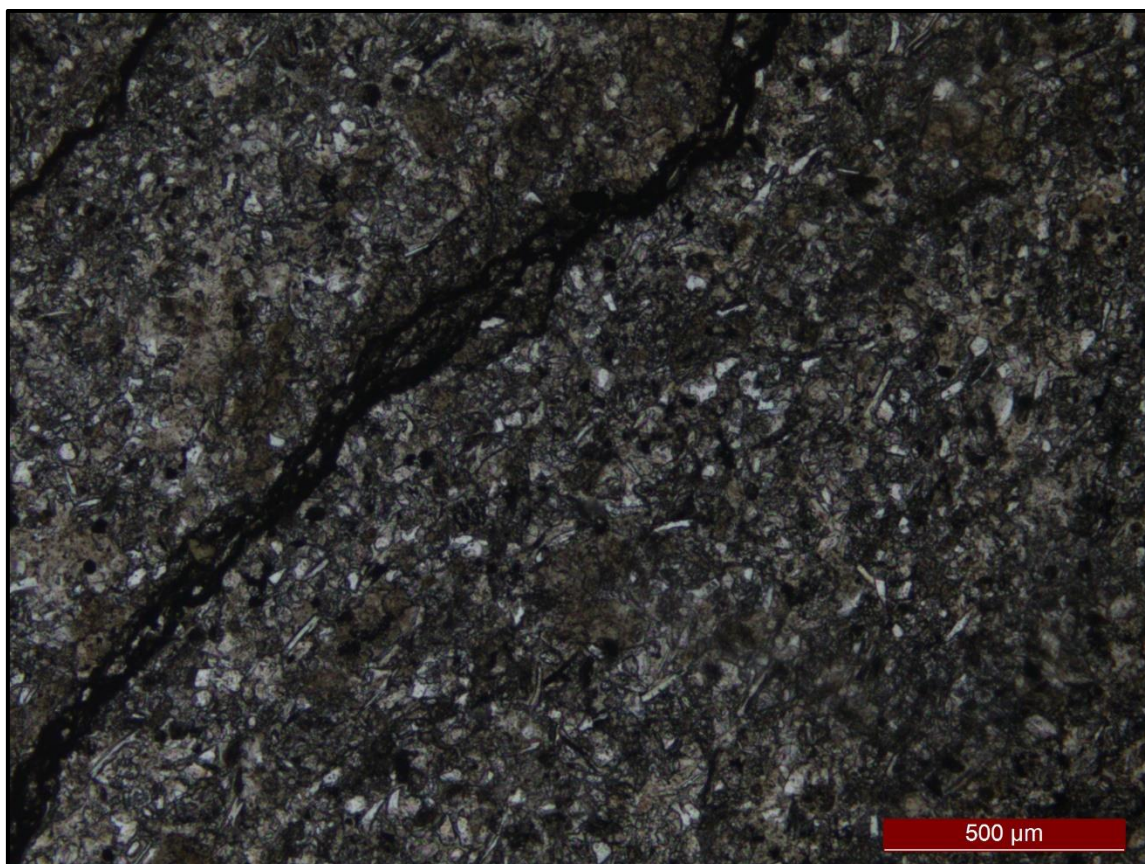
Foto: Polarizadores Paralelos.



Lâmina G4.5: *Wackestone* Intraclástico Laminado

Rocha carbonática laminada, de granulometria silte médio, com finos níveis opacos irregulares e ondulados que marcam o acamamento. Apresenta grãos de quartzo subangulosos, micas brancas, feldspato, cloritas, intraclastos e opacos. Os intraclastos, compostos de *mudstone* e de pelitos, encontram-se geralmente alongados e ondulados segundo o acamamento da rocha, de tamanho areia a seixo, atingindo até 4 a 7mm. As micas são orientadas, principalmente nas partes onde há mais carbonato. Contem laminações com bastante carbonato e quartzo, e outras com argila cloritizada e quartzo. No geral, tem 65% de matriz carbonática recristalizada, 20% de quartzo, e 15% de outros constituintes. As proporções variam em cada lâmina da rocha.

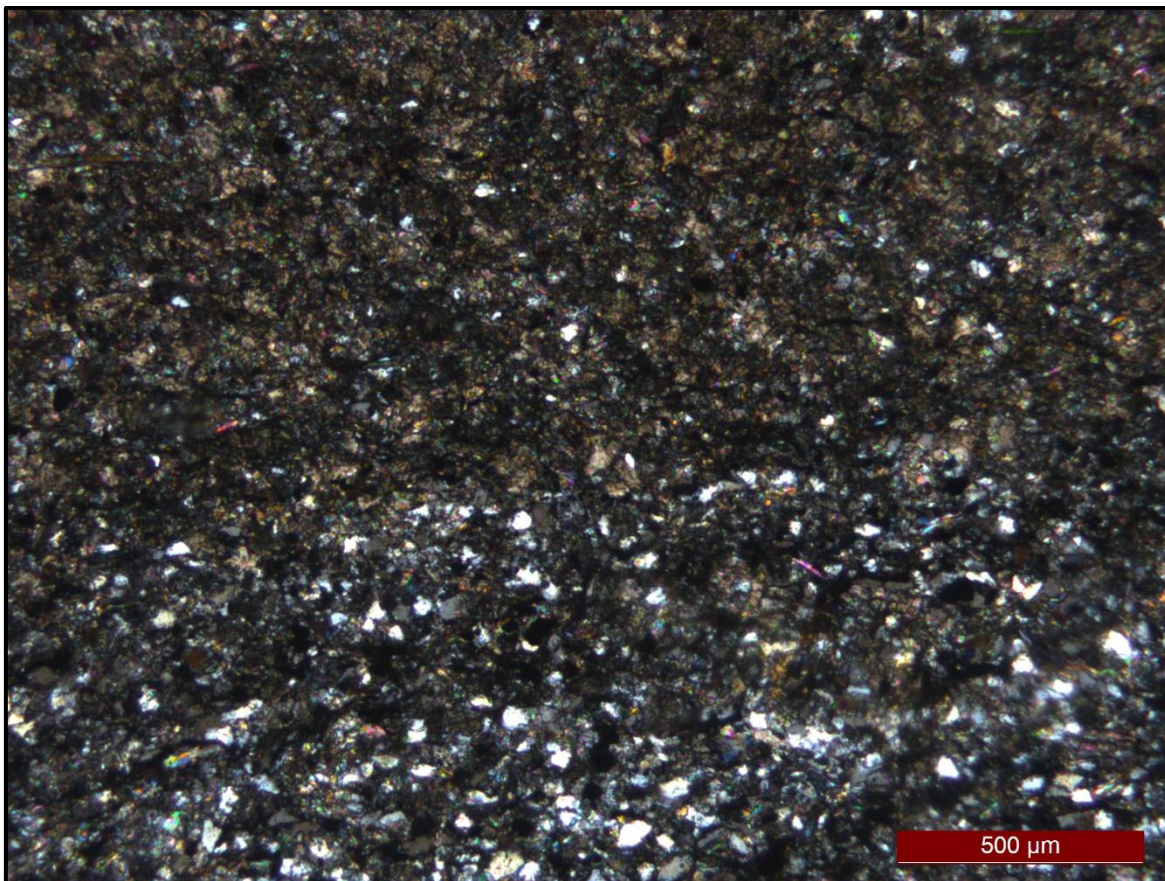
Foto: Visão geral da lâmina com quartzos angulosos e micas dispersas. Detalhe de estilólitos de minerais opacos. Polarizadores paralelos.



Lâmina G4.6: Siltito laminado com matriz carbonática

Rocha carbonática e quartzosa de granulometria silte grosso e médio. Apresenta-se muito laminada, com os níveis marcados por minerais opacos. A proporção mineral apresenta 50% de quartzo subanguloso, 45% de carbonato, e 5% de argilominerais e clorita na matriz e mica branca.

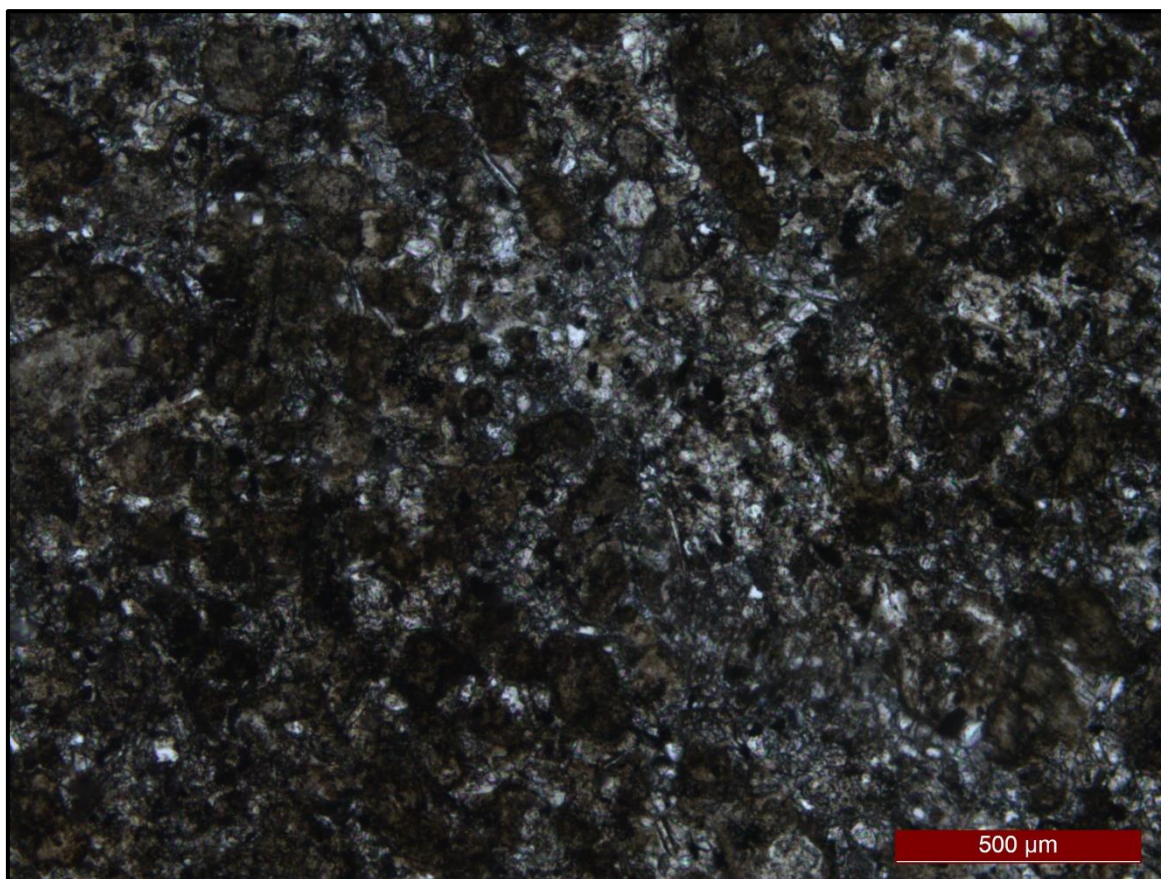
Foto: Polarizadores Cruzados.



Lâmina G4.7: *Grainstone* Intraclástico

Rocha carbonática híbrida laminada de granulometria silte grosso, com níveis com laminação marcada pela diferença de concentração de grãos de areia fina de intraclastos pelíticos (30%). O cimento é composto por carbonato, contendo também minerais opacos, micas brancas orientadas e grãos de quartzo subarredondados a subangulosos. Os intraclastos podem estar globulares ou alongados e angulosos e apresentam-se com inclusões de opacos. A proporção dos minerais da rocha varia em cada lâmina presente, com carbonato dominante, que varia entre 70% a 80%, intraclastos 20 a 30%, enquanto o quartzo, opacos, micas brancas e clorita completam a proporção, compondo aproximadamente 10%, com raros ooides dispersos.

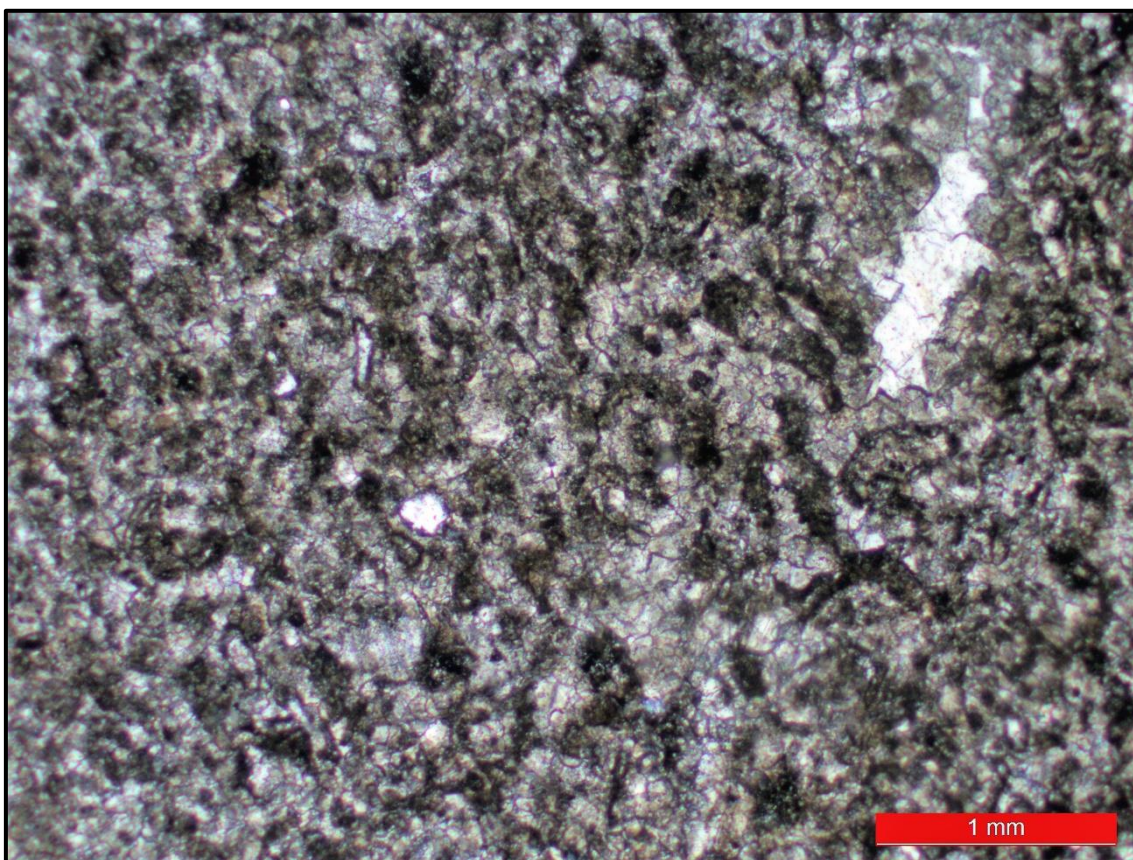
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G4.9: *Grainstone* Intraclástico

Rocha carbonática maciça, contendo grãos carbonáticos (50%) e cimento espático blocoso (50%) que mostra contatos entre grãos de calcita com 120° . Apresenta grãos angulosos a subangulosos de intraclastos pelíticos e raros grãos subarredondados de oóides. A granulometria predominante é areia grossa a média, sendo que os grãos são mal definidos, provavelmente afetados pela elevada recristalização da rocha. Apresenta veios de calcita grosseira.

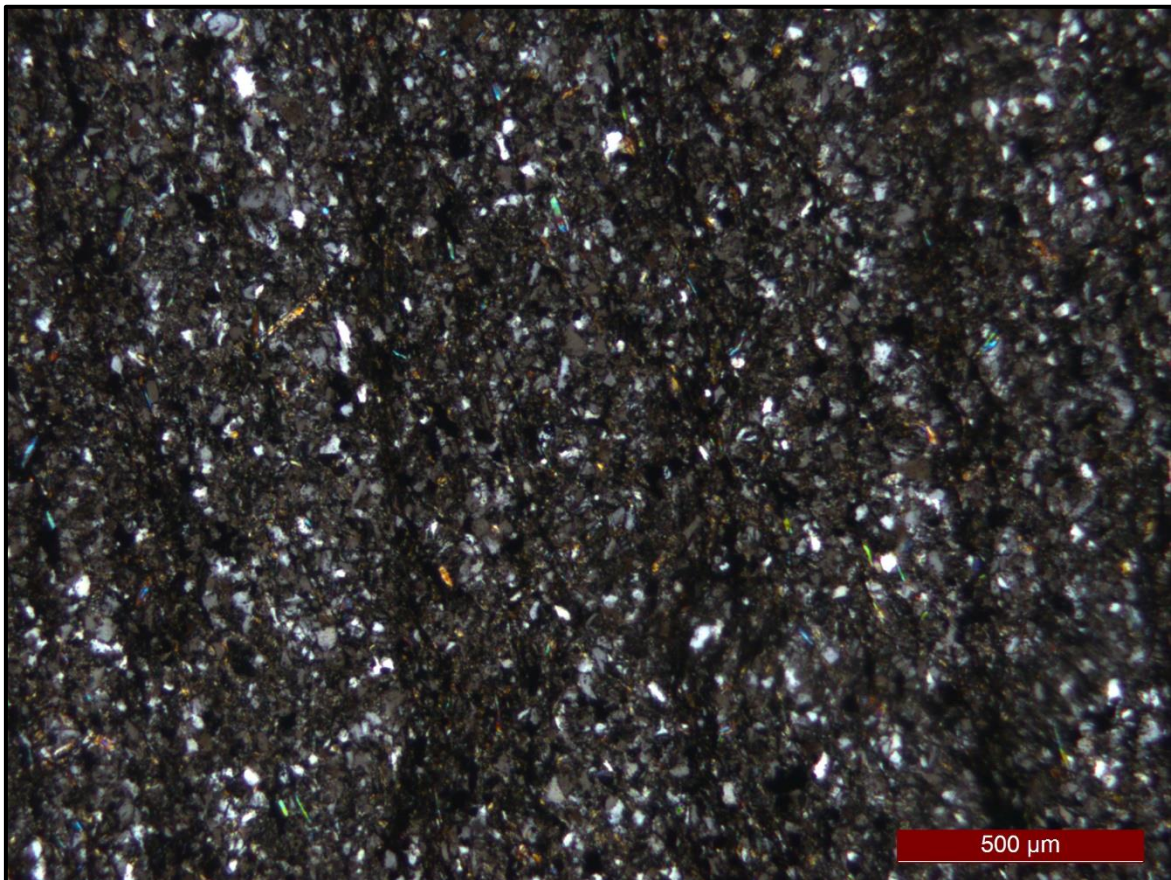
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G4.10: Siltito

Rocha de granulometria silte grosso, muito laminada. Contém muitos grãos de quartzo subangulosos a angulosos (65%) e opacos (10%), que são envolvidos pela matriz de argila cloritizada (15%) e micas brancas detríticas (5%). Apresenta raros grãos de feldspato (5%). Concentração de opacos (10%) acompanhando o acamamento são observadas. Localmente, observa-se foliação com micas e material opaco orientados, fazendo ângulo com o acamamento.

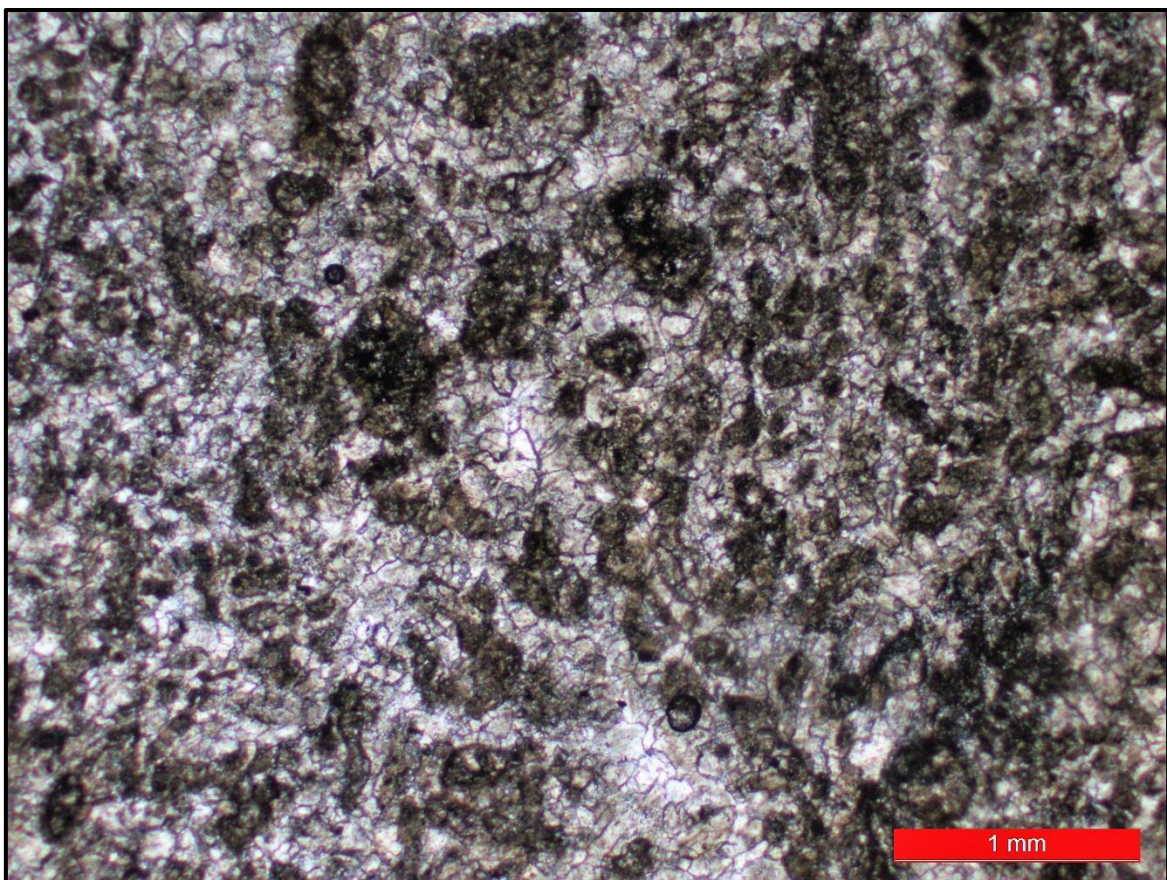
Foto: Laminação em siltito. Polarizadores cruzados.



Lâmina G4.12: *Grainstone* Intraclástico

Rocha carbonática cristalina, de granulometria areia muito fina, contendo predominantemente cimento espático blocoso a granular (60%), além de intraclastos (30%) e raros ooides (10%) dispersos. Esses grãos apresentam-se mal preservados, de granulometria areia média. Observa-se cristais de carbonatos euédricos grossos, devido, possivelmente, a forte recristalização. A rocha contém poucos grãos de material opaco por vezes ocorrendo em finas lâminas acompanhando o acamamento.

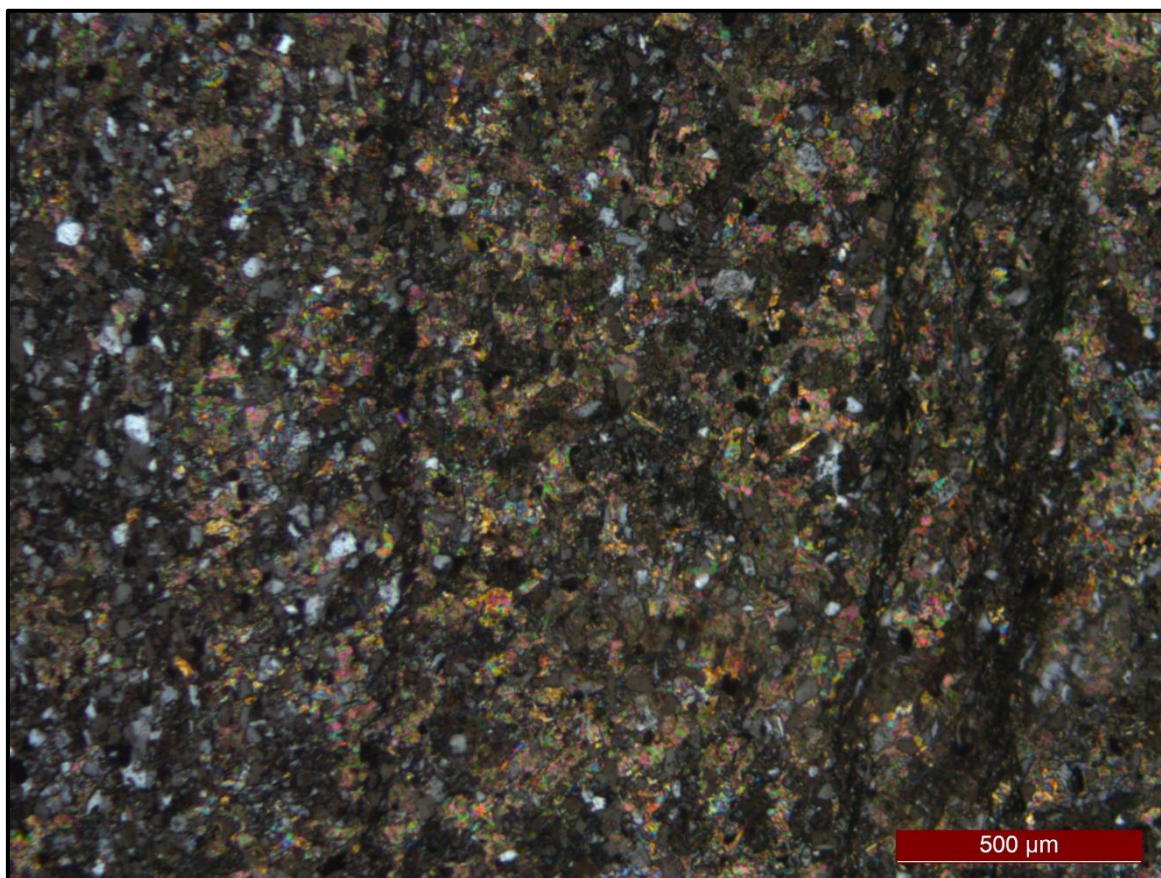
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G4.13: Siltito

Rocha de granulometria silte grosso, com grande predominância de grãos de quartzo (85%), matriz carbonática com um pouco de argila cloritizada (7%) e minerais opacos ocorrem por toda a lâmina (8%). Apresenta raros grãos de feldspato. Laminações são marcadas por concentração de opacos, níveis argilosos cloritizados e micas brancas. Na base há lâminas mais carbonáticas, onde algumas contem maior quantidade de micas orientadas.

Foto: Siltito com matriz carbonática. Polarizadores cruzados.

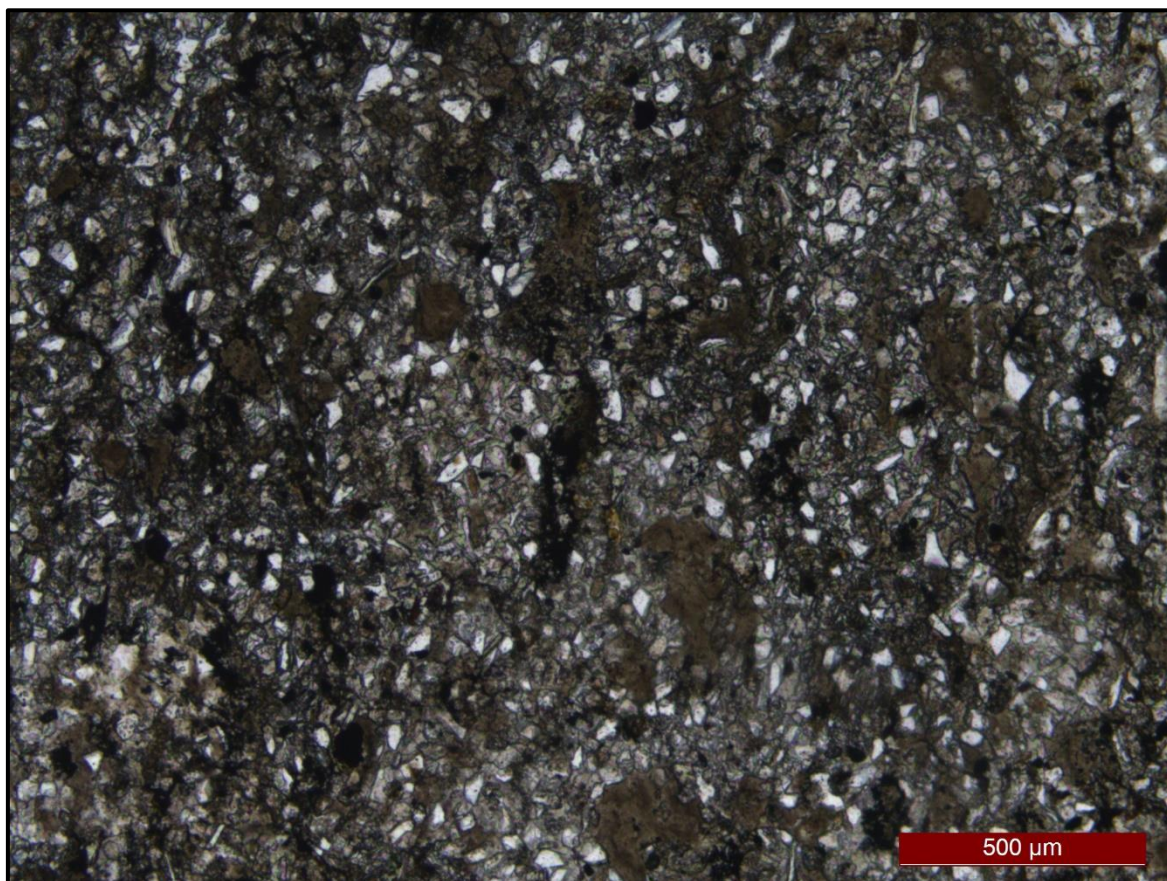


PERFIL 5

Lâmina G5.1: *Wackestone* Intraclástico

Calcilutito de granulometria silte médio a areia muito fina. Contém matriz carbonática micrítica (50%), grãos de quartzo subangulosos (15%), intraclastos amarronzados de material pelítico (15%), opacos (15%) e micas brancas mais ou menos orientadas em menor quantidade (5%). Como minerais acessórios, apresenta epidoto e clorita. Observa-se minerais opacos e intraclastos estirados que provavelmente ocorrem devido ao cisalhamento rúptil.

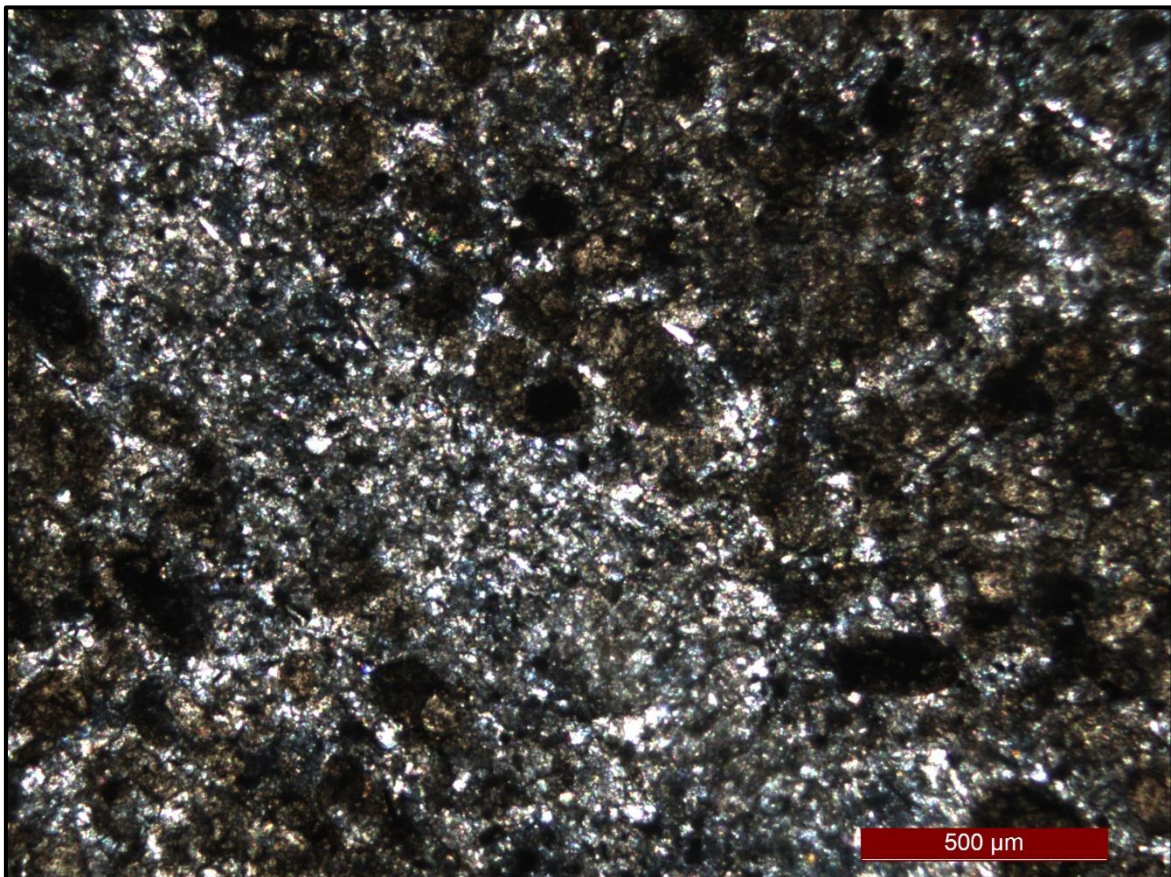
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.2: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha muito laminada composta predominantemente por grãos intraclásticos subangulosos, ooides e cimento carbonático. A proporção desses componentes é o que define as lâminas da rocha. Existem lâminas, geralmente mais finas, composta por 70% de cimento espático, com 10% de opacos, 10% quartzo e 10% de micas, com poucos grãos carbonáticos, enquanto outras apresentam compostas 40% por intraclastos, 20% por ooides, 30% de cimento, e 10% quartzo e opacos. Na base observa-se camada com foliação oblíqua ao acamamento marcada por linhas de minerais opacos. Além desses opacos, observa-se cimento carbonático, micas, intraclastos e porções quartzosas.

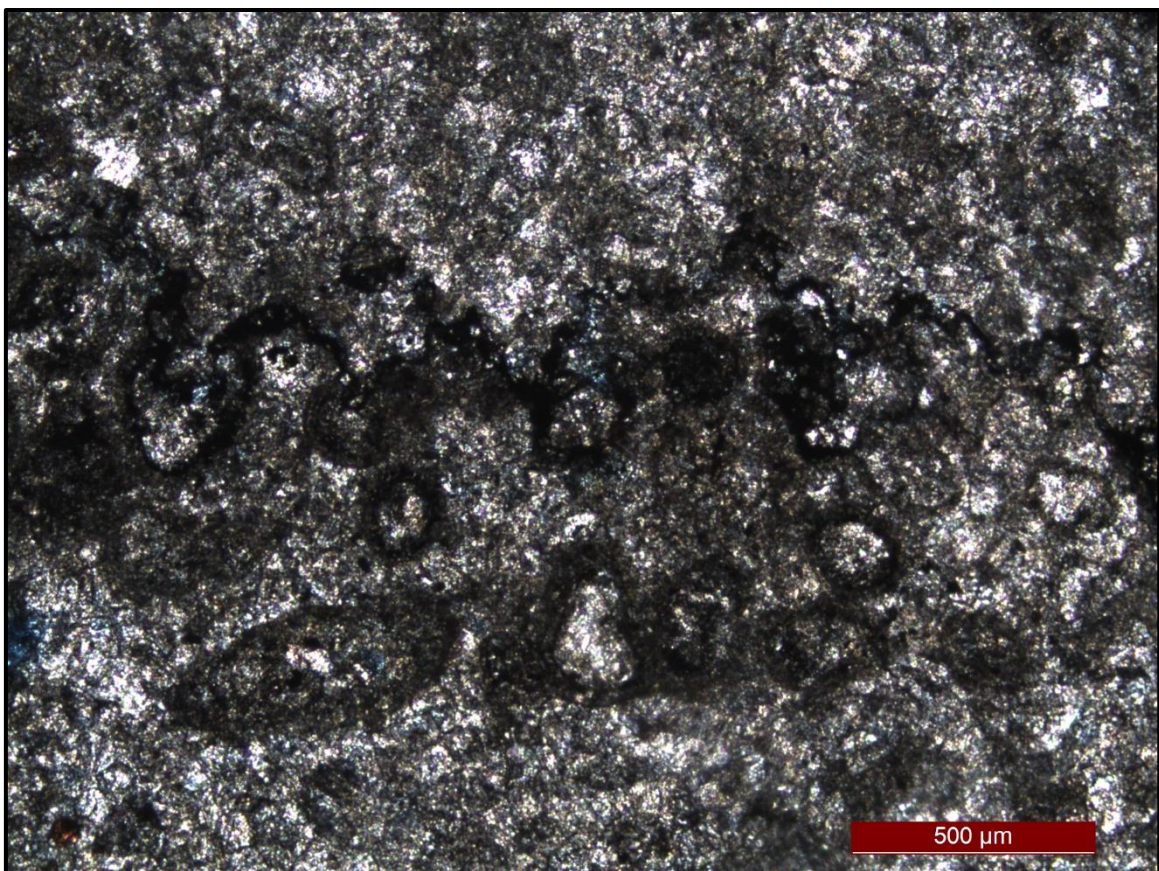
Foto: Polarizadores cruzados.



Lâmina G5.3: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha carbonática muito recristalizada, formada por cimento espático blocoso que mascara outros constituintes da rocha, provavelmente ooides e intraclastos afetados por essa alta recristalização, apresentando como “fantasmas”. O cimento compõe 70% da lâmina, enquanto esses relictos de grãos 30%. A lâmina ainda apresenta grossos veios de calcita espática, em que é possível observar suas maclas e clivagem. Nesses veios e nas laminações de opacos, ou próximas delas, observa-se pequenos poros.

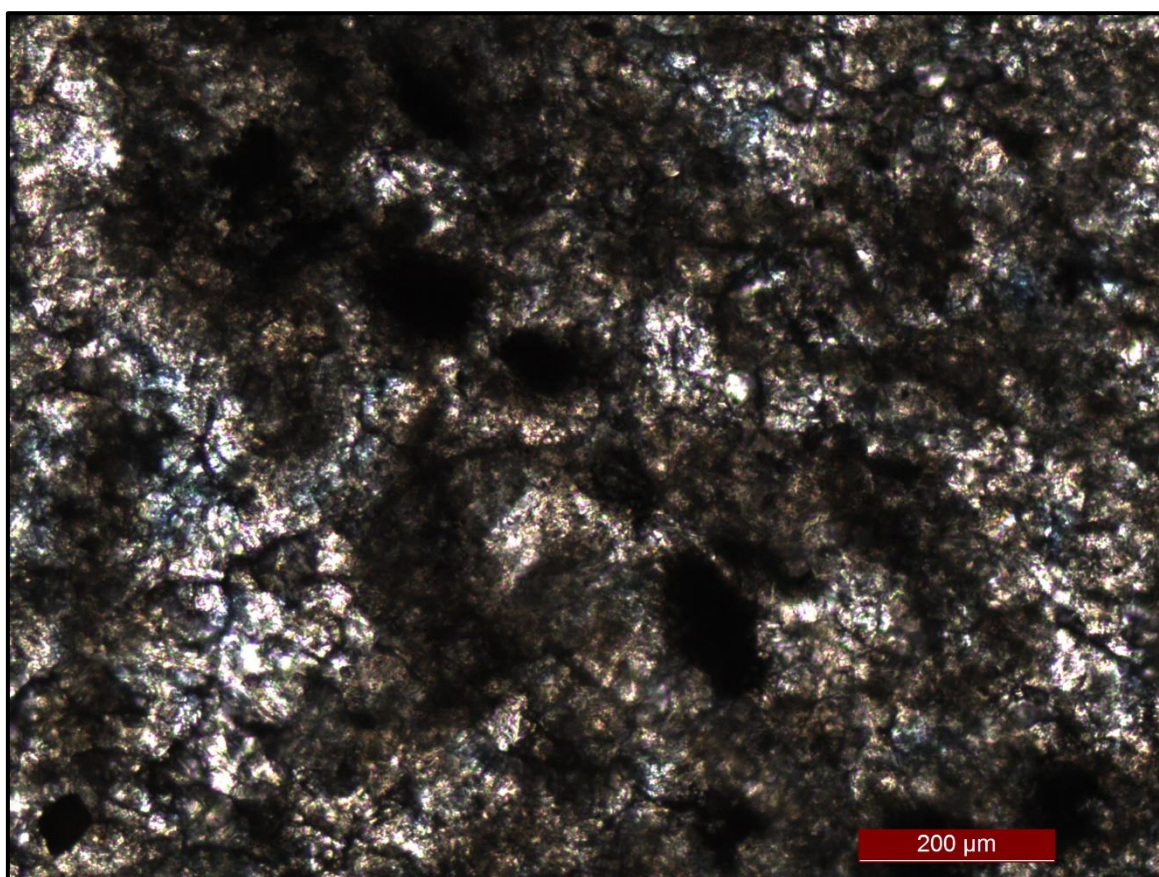
Foto: Polarizadores Paralelos.



Lâmina G5.4: *Grainstone* Intraclástico

Rocha composta por cimento carbonático e intraclastos pelíticos e/ou laminados. Encontra-se cortada por finas fraturas não preenchidas, onde há porosidade secundária. Apresenta aproximadamente 20% de opacos, que podem ocorrer em cristais dispersos (pirita framboidal) ou formando finas laminações. Os intraclastos de *mudstone* podem ser alongados de até 1 cm. Grãos completamente substituídos por opacos ocorrem localmente na lâmina, provavelmente de oolite. A lâmina em geral apresenta um aspecto de ambiente de formação bastante turbulento.

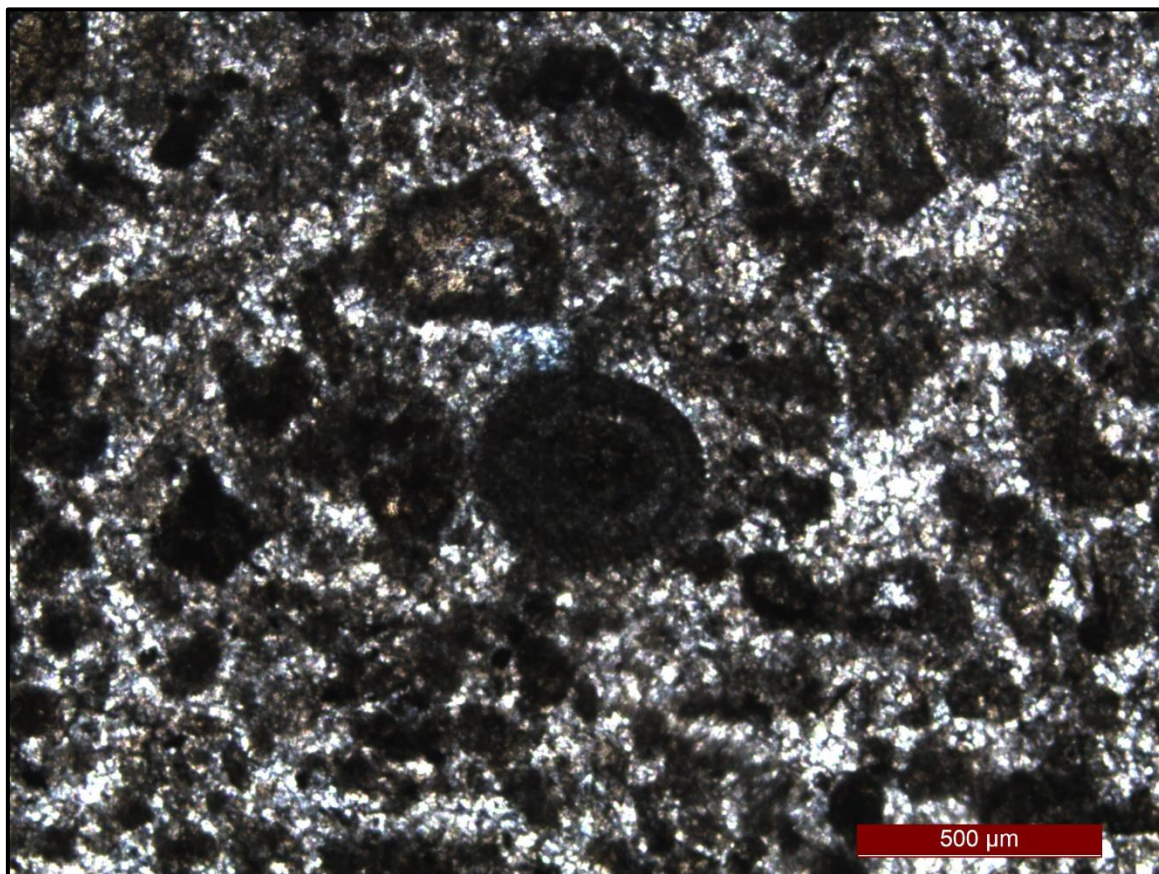
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.5: *Grainstone* Ooidal Intraclástico

Rocha muito laminada composta por 40% de grãos ooidais, 20% de intraclastos pelíticos, por vezes angulosos, e 40% de cimento carbonático blocoso a granular. A rocha encontra-se cortada por veios de calcita finos e grossos, alguns com certa porosidade. As lâminas são diferenciadas a partir da concentração de grãos e de cimento e da granulometria dos componentes. Observa-se gradação granulométrica da base para topo. Opacos podem aparecer dispersos na lâmina ou substituindo os grãos aloquímicos. O topo da lâmina apresenta laminação/foliação de opacos.

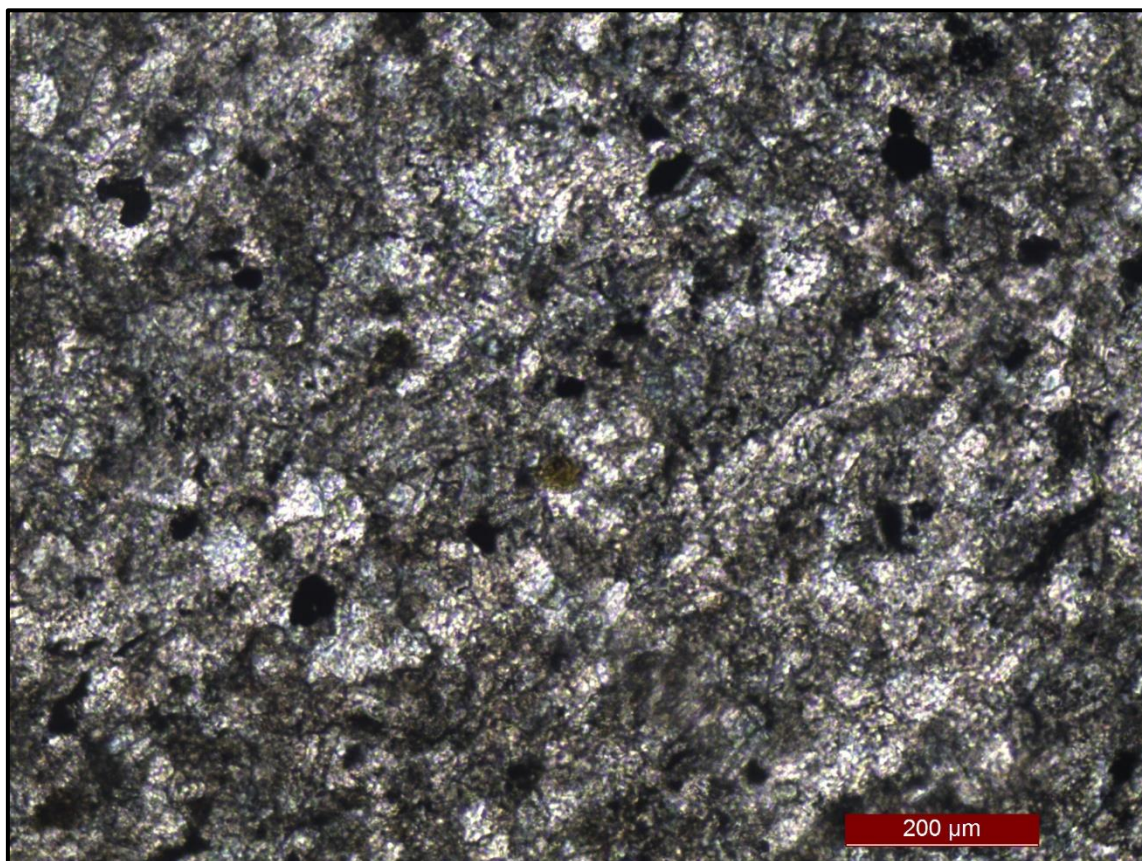
Foto: Intraclastos dispersos e detalhe de oóide com estrutura concêntrica preservada no centro da foto. Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.6: *Grainstone* Recristalizado

Rocha laminada composta predominantemente por cimento de calcita fino. Apresenta também grãos de quartzo (20%), opacos (10%), plagioclásios (5%) e raras turmalinas. As lâminas variam a concentração de seus componentes, tendo então níveis mais quartzosos e níveis mais carbonáticos.

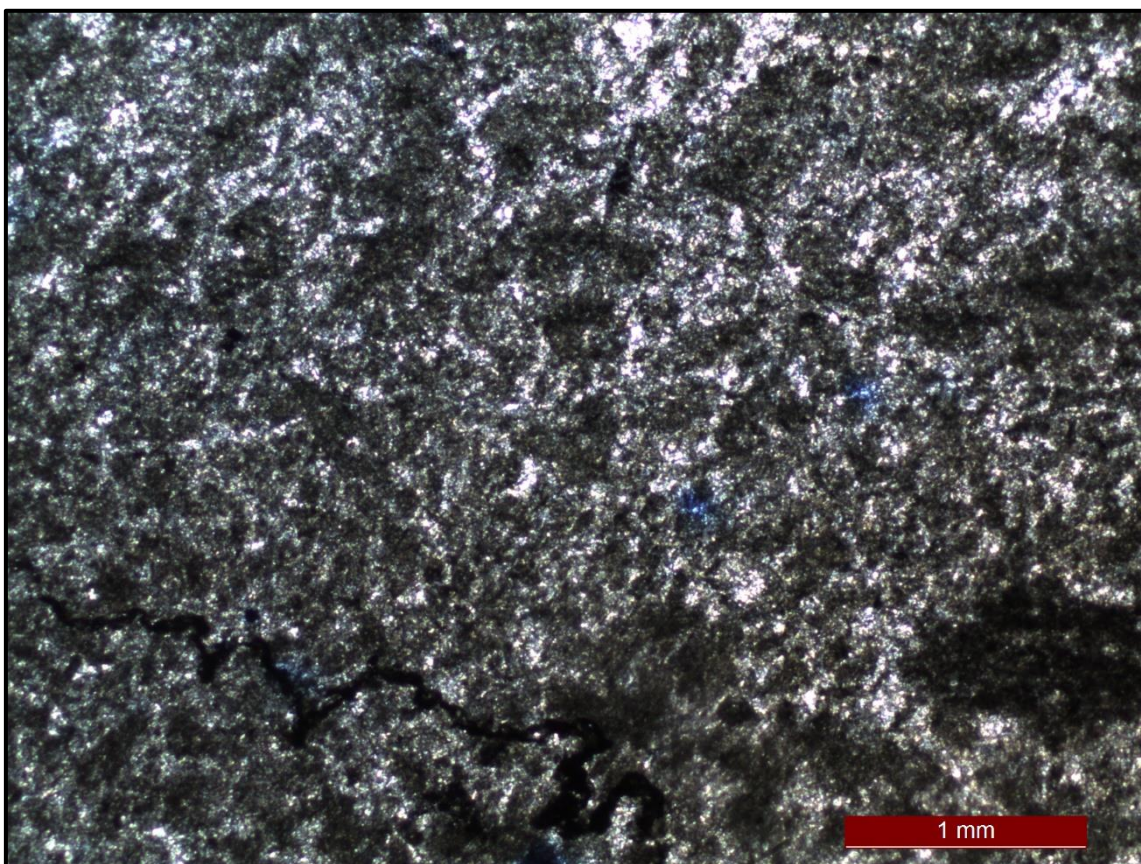
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.7: *Grainstone* Intraclástico

Rocha caracterizada por apresentar intraclastos de *mudstone*, de tamanhos variados, de até 2 cm, além de lentes compostas pelo mesmo material. É composta também por cimento de calcita espática (50%) e focos de calcita espática grossa localizados. Apresenta fraturas não preenchidas e lâminas de estilólitos em que há microfraturas acompanhando seus níveis, caracterizando uma porosidade secundária do tipo canal.

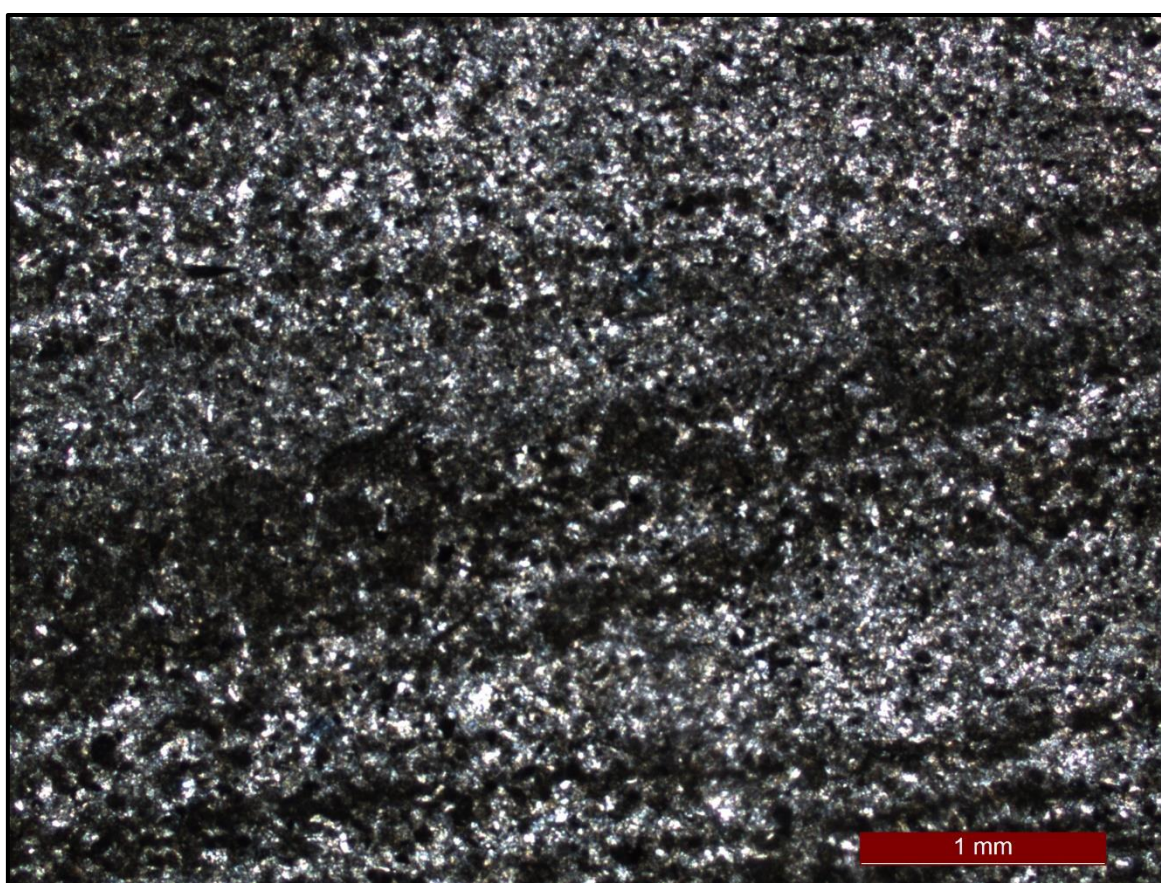
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.8: *Grainstone* Intraclástico

Rocha muito laminada composta por lâminas com predominância de calcita espática (70%), ainda com grãos de minerais opacos e quartzo (30%), lâminas com alta concentração de intraclastos (50%) e cimento calcítico (40%), com pouco quartzo e opacos (10%) e lâminas de granulometrias muito finas, de micrita, provavelmente um *mudstone*. Essas lâminas por vezes apresentam estrutura de truncamento. Observa-se porosidade secundária acompanhando níveis de minerais opacos.

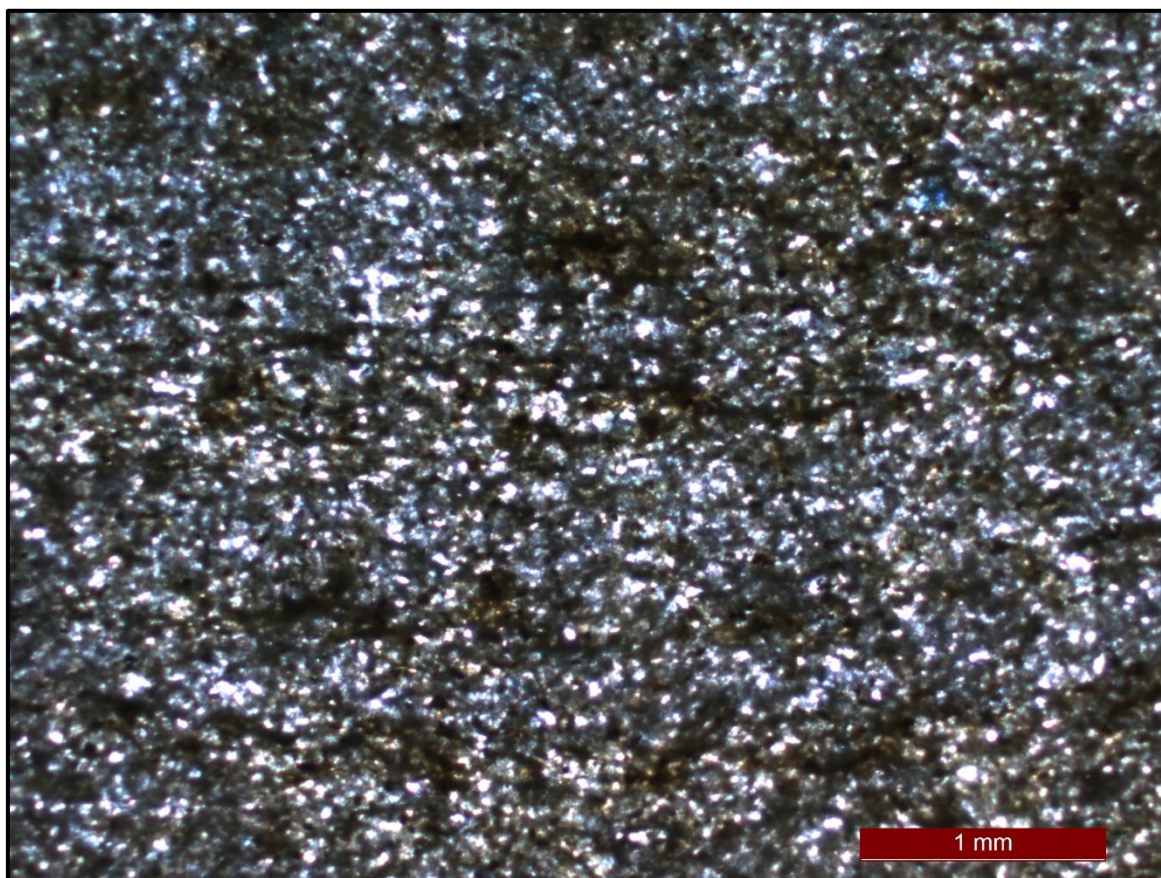
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.9: Siltito

Rocha laminada, muito fina. Predominância de frações siltíticas de tom marrom-amarelado. Observa-se lâmina com níveis de cor mais escuras, mais finas, contendo óxidos dispersos, onde há porosidade acompanhando esse nível. Cortando essa lâmina, há outra fratura também não preenchida, fazendo praticamente 90° ao acamamento. Apresenta pouco cimento espático, situado entre as massas pelíticas finas.

Foto: Polarizadores paralelos.

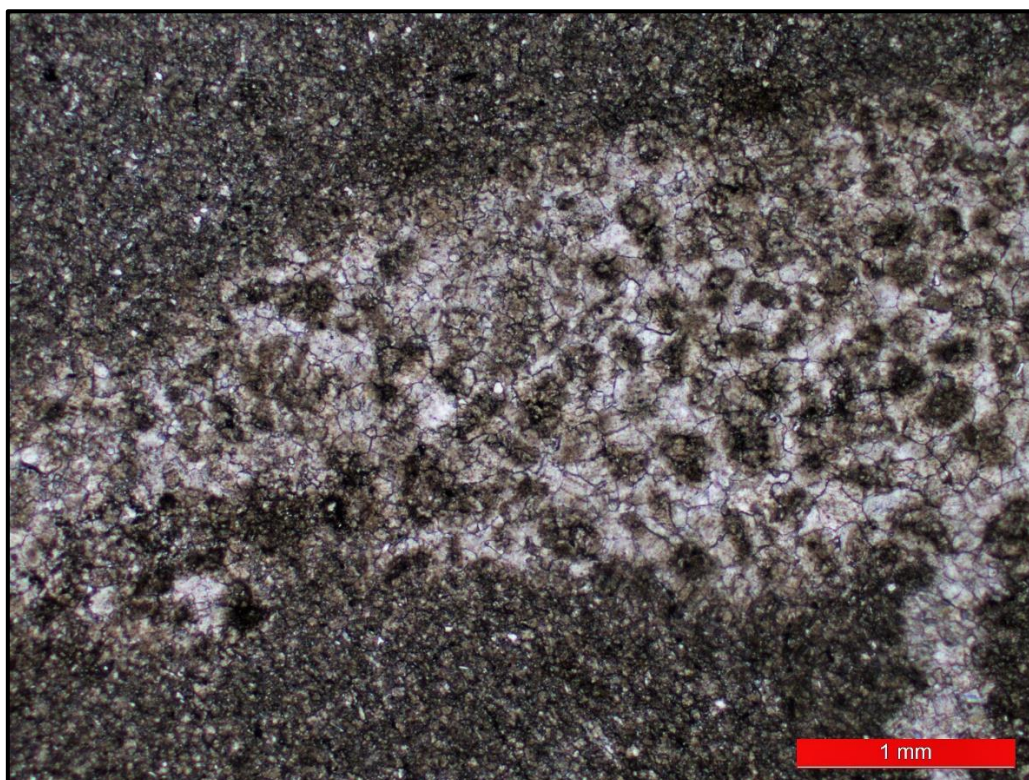


Lâmina G5.10: *Grainstone* Intraclástico

Rocha laminada, composta predominantemente por cimento de calcita espática fina (45%) e resquícios de intraclastos (45%). Observa-se grossos veios de calcita espática e poucos grãos de quartzo (5%), mais concentrados em determinadas lâminas, micas e opacos (5%). Linhas estilolíticas de opacos também ocorrem concordantes com o acamamento, onde há porosidade seguindo o lineamento. Ainda existem lentes compostas por cimento muito mais fino.

Lâmina G5.11: *Mudstone*

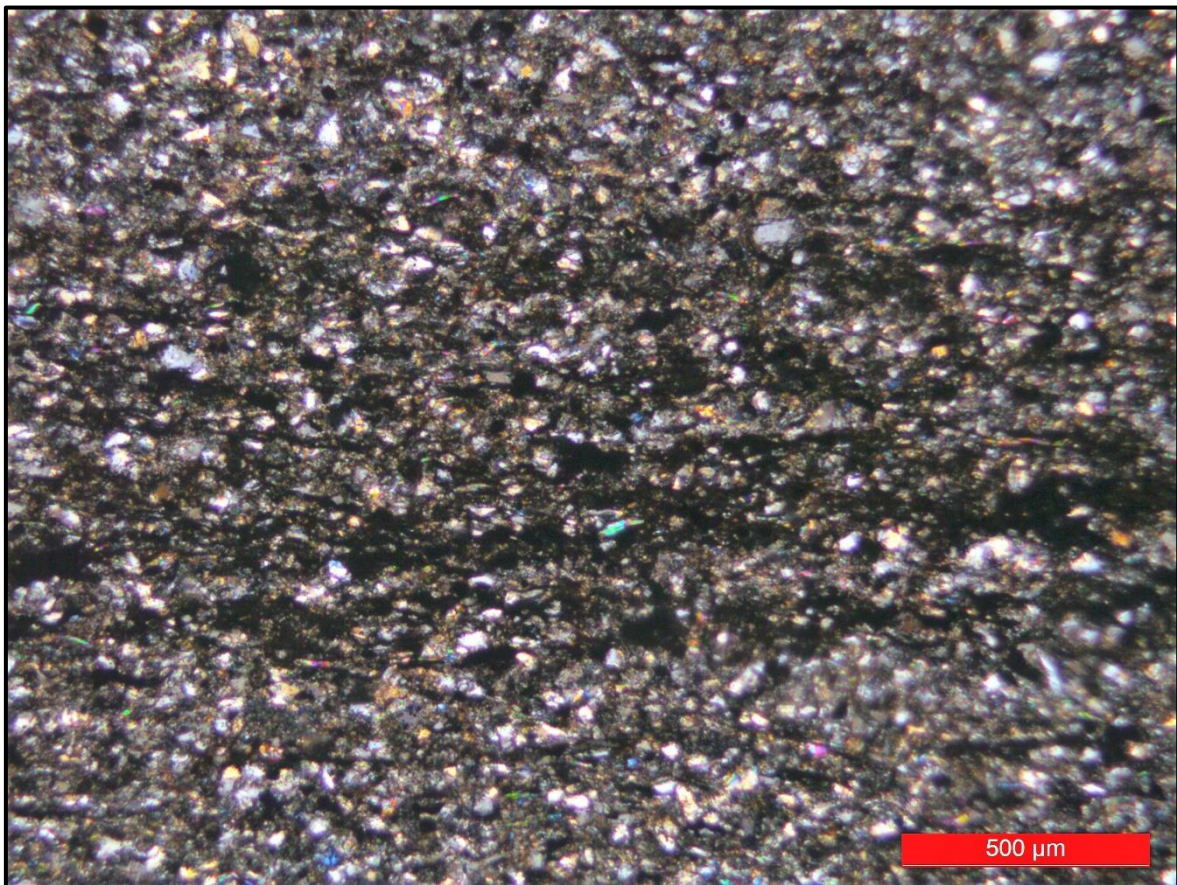
Rocha carbonática (90 a 95%) de granulometria argila a silte, contendo poucos grãos de quartzo, de granulometria silte médio a grosso, micas e opacos (5 a 10%). Na base contém um nível mais grosso, laminado, contendo cimento espático. Um nível de material opaco separa essas duas granulometrias. Perpendicular ao acamamento observa-se uma “lente” de material mais grosso, contendo cimento espático e grãos não identificados, que provavelmente representa uma greta de contração ou de sinerese. Essa lente é mais grossa no topo. Foto: Detalhe de veio preenchido por calcita e intraclastos. Polarizadores paralelos



Lâmina G5.12: Siltito laminado com matriz carbonática

Rocha carbonática híbrida, laminada, com variação granulométrica, entre silte grosso e fino. Há níveis mais carbonáticos, intercalando com níveis com mais opacos, clorita (minerais prismáticos com leve pleocroísmo verde oliva), quartzo subanguloso e micas detriticas. A laminação mostra concentração de minerais opacos que apresentam aspecto anastomosado, devido ao cisalhamento.

Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.13: Siltito com matriz carbonática

Rocha de granulometria silte médio a grosso, muito laminado, com alternância de níveis com predomínio de material carbonático e níveis escuros com predomínio de materiais silicosos. Nos níveis carbonáticos, com 60% aproximadamente, ocorrem ainda, 15% de quartzo e uma quantidade menor de opacos, micas brancas e intraclastos. Os carbonatos se apresentam como agregados, provavelmente de origem diagenética. Nas lâminas escuras, de granulometria mais grossa, com predomínio de grãos de quartzo (50%), ocorrem ainda matriz carbonática micrítica (20%), material opaco, mica detrítica (30%), definindo um siltito. Cloritas também são encontradas, principalmente na matriz.

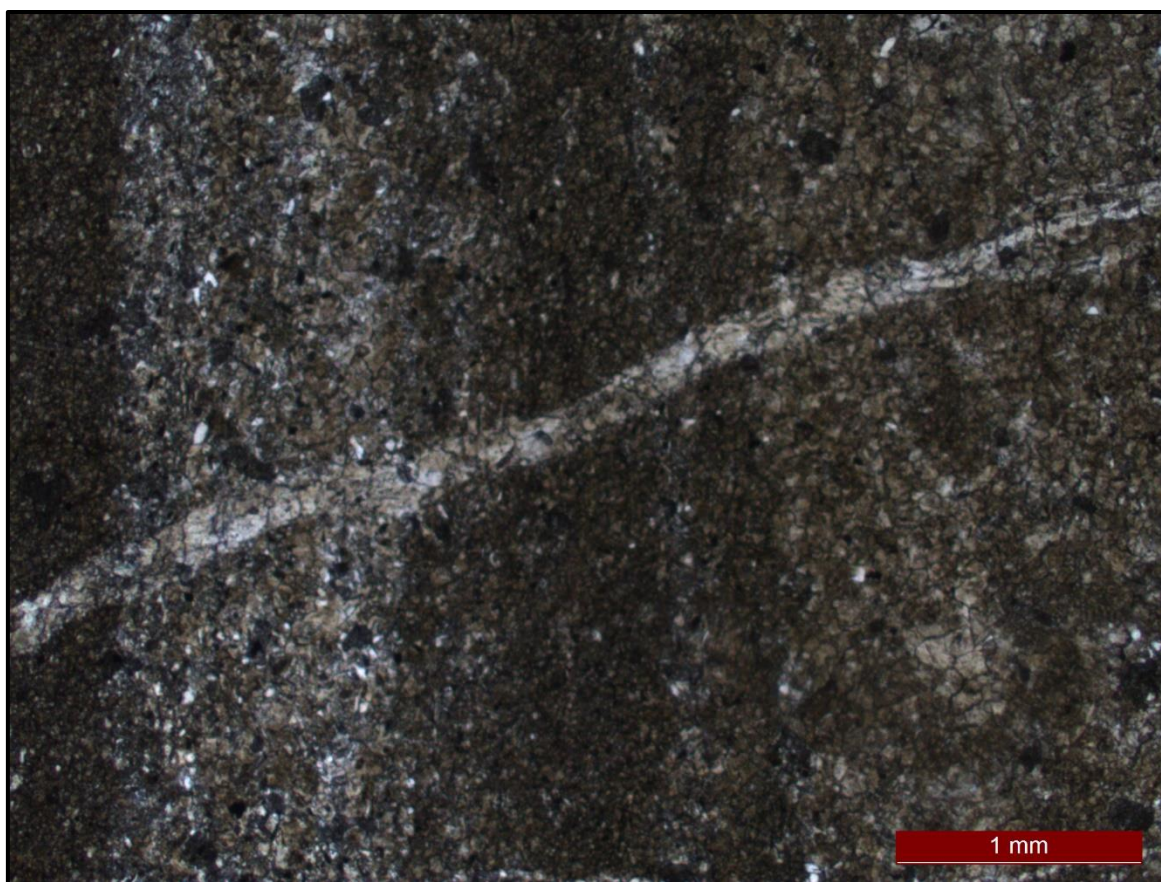
Foto: Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.14: *Mudstone*

Rocha carbonática muito laminada por diferença de composição e granulometria, variando de silte fino a grosso. Apresenta lâminas com baixo teor de quartzo (20%), opacos dispersos (20%) e cerca de 60% de carbonato, além de lâminas de calcilutito híbrido com grãos de quartzo (40%), opacos (10%) e ripas de mica branca (5%) dispersos em uma matriz carbonática fina (45%). O acamamento é cortado por veios de calcita espática finos a médios.

Foto: Detalhe de veio calcítico cortando a laminação da rocha. Polarizadores paralelos.



Lâmina G5.16: *Grainstone* Intraclástico

Rocha carbonática de granulometria areia muito fina a silte, com mosaico de cimento espático blocoso predominante na rocha (50%), indicando forte recristalização (neomorfismo), que envolve relíctos de grãos de intraclastos piritizados (40%). Contém poucos minerais opacos espalhados na lâmina (10%). Apresenta porções com calcita recristalizada grossa (calcita espática).

Foto: Detalhe de grandes cristais calcícticos recristalizados.

