



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



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Sedimentologia e estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio do Grupo Vazante na região de Morro Agudo, Paracatu/MG.

**AUTOR:** Marcus Paulo Sotero

**ORIENTAÇÃO:** Prof. Dr. Fabrício de Andrade Caxito

Nº 199

**BELO HORIZONTE**

**29/03/2019**



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



## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sedimentologia e estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio do Grupo Vazante na região de Morro Agudo, Paracatu/MG.

MARCUS PAULO SOTERO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geologia.

**Área de concentração:** Geologia Regional

**Orientador:** Prof. Dr. Fabrício de Andrade Caxito

Belo Horizonte

2019

**“Caiu a chuva, vieram as enchentes, os ventos deram contra a casa, mas a casa não caiu,  
porque estava edificada sobre a rocha.”**

**Mateus 7: 25**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Sedimentologia e estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio do Grupo Vazante na região de Morro Agudo, Paracatu/MG.**

**MARCUS PAULO SOTERO**

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 29 de março de 2019, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Fabrício de Andrade Caxito - Orientador  
UFMG

Prof. Isaac Daniel Rudnitzki  
UFOP

Prof. Gabriel Jubé Uhlein  
UFMG

Belo Horizonte, 29 de março de 2019.

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador deste trabalho, o Prof. Dr. Fabrício A. Caxito, pelos ensinamentos, disponibilidade, motivação e entusiasmo pela geologia.

Às universidades de Ouro Preto (Escola de Minas – UFOP) e Minas Gerais (UFMG) pela oportunidade e auxílio durante os cursos de graduação e pós-graduação, respectivamente. Tiveram papéis fundamentais no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço ao SGB/CPRM pelo apoio a este projeto e pela disponibilização de dados e dos testemunhos de sondagem para as descrições e coleta de amostras, fundamentais para o trabalho.

Aos Professores Carlos Alvarenga e Roberto Ventura, e a equipe do Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB).

Aos colegas do SGB/CPRM, especialmente à unidade de Belo Horizonte, pelo companheirismo, incentivo, e pelos enriquecedores debates geológicos. Ao LAMIM-Caeté pelo apoio na descrição dos testemunhos de sondagem. Aos colegas Paulo Dias, Marcelo Marinho e Marco Aurélio Pinheiro pelas discussões e sugestões ao projeto e ao manuscrito.

Aos colegas da *Nexa Resources*, em especial aos geólogos Gustavo Oliveira, Fernando Baia, Jéssica Alcantara e Naje Hilal pelas discussões, acessibilidade e contribuições ao projeto.

Finalmente, dedico os maiores agradecimentos aos meus principais incentivadores. Aos meus pais, pelo apoio incondicional, por sempre me motivarem nos estudos, e por serem minha grande inspiração de vida. Ao meu irmão, Guto, pelo companheirismo, e por ser um grande exemplo a ser seguido. A minha esposa, Marina, pelo amor e companheirismo em todos os momentos. E por fim, aos meus amigos e colegas, e a todos que de alguma forma torceram por mim.

Meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 – Considerações iniciais .....	1
1.1.1 – Tema proposto .....	1
1.2 – Estrutura da dissertação.....	1
1.3 – Localização e vias de acesso .....	2
1.4 – Justificativa e objetivos .....	3
1.4.1 – Justificativa e relevância.....	3
1.4.2 – Objetivos.....	3
1.5 – Materiais e métodos.....	4
1.5.1 – Revisão bibliográfica .....	4
1.5.2 – Levantamentos de campo .....	4
1.5.3 – Descrição da sondagem .....	4
1.5.4 – Descrição petrográfica .....	5
1.5.5 – Análise de fácies .....	5
1.5.6 – Análises químicas .....	6
1.5.7 – Estratigrafia isotópica .....	6
1.5.8 – Avaliação da alteração e seleção das amostras.....	11
1.5.9 – Integração dos dados e análise estatística .....	13
<b>2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>14</b>
2.1 – Faixa Brasília.....	14
2.2 – Grupo Vazante.....	16
2.2.1 – Trabalhos anteriores no Grupo Vazante .....	16
2.2.2 – Faixa Vazante .....	18
2.2.3 – Estratigrafia.....	20
2.2.4 – Região de Morro Agudo .....	23
<b>3. ANÁLISE DE FÁCIES E AMBIENTES DEPOSICIONAIS.....</b>	<b>27</b>
3.1 – Introdução.....	28
3.2 – Contexto geológico.....	29
3.2.1 – Geologia regional.....	29

3.2.2 – Estratigrafia local da região de Morro Agudo .....	31
3.3 – Materiais e métodos.....	33
3.4 – Resultados e discussões.....	33
3.4.1 – Fácies sedimentares .....	34
3.4.2 – Associações de fácies .....	44
3.4.3 – Inferências regionais.....	47
3.4.4 – Paleoambientes e evolução da bacia.....	49
3.5 – Conclusões.....	52
<b>4. ESTRATIGRAFIA ISOTÓPICA.....</b>	<b>53</b>
4.1 – Introdução.....	54
4.2 – Contexto geológico.....	54
4.2.1 – Grupo Vazante na região de Morro Agudo .....	56
4.3 – Materiais e métodos.....	60
4.4 – Resultados .....	61
4.4.1 – Elementos químicos.....	61
4.4.2 – Isótopos de carbono e oxigênio .....	62
4.5 – Discussões .....	65
4.5.1 – Diagênese e alteração hidrotermal.....	65
4.5.2 – Estratigrafia isotópica (C e O) .....	69
4.5.3 – Correlação quimioestratigráfica.....	73
4.6 – Conclusões.....	75
<b>5. DISCUSSÕES .....</b>	<b>76</b>
5.1 – Fácies sedimentares e ambientes deposicionais do Grupo Vazante.....	76
5.2 – Estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio .....	77
5.3 – Correlação estratigráfica regional .....	79
<b>6. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da região de Morro Agudo. ....	2
Figura 1.2: Fluxograma da metodologia utilizada na Análise de Fácies. Baseado em Reading (1986) e Walker & James (1992).....	6
Figura 1.3: Amostragem de material para análises isotópicas. a – Furadeira de mesa; b – Local amostrado. ....	11
Figura 1.4: Amostras alteradas por hidrotermalismo. a – fotomicrografia de dolarenito totalmente substituído por sílica microcristalina, mantendo ainda a forma dos grãos; b – amostra de dolarenito silicificado, sulfetado e mineralizada em zinco (local da análise demarcado por um círculo). ....	12
Figura 1.5: Dispersão dos resultados de $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ dos carbonatos (214 amostras). Os coeficientes de ajuste das linhas de tendência dos resultados ( $R^2$ ) de cada unidade estão indicados na figura. ....	13
Figura 2.1: Mapa Tectônico e localização da área. a – Localização da Faixa Brasília no contexto do cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim & Teixeira, 2017); b – Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck <i>et al.</i> 2005.....	14
Figura 2.2: Mapa geológico simplificado da Faixa Vazante (Baseado em Dias <i>et al.</i> , 2018). ....	19
Figura 2.3: Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000). As formações Santo Antônio do Bonito e Rocinha foram correlacionadas com unidades do Grupo Bambuí (Misi <i>et al.</i> , 2011; Signorelli <i>et al.</i> , 2013). ....	20
Figura 2.4: Colunas litoestratigráficas e subdivisões propostas para as regiões de Paracatu (A), definidas pelo projeto da Termerid Mineração, e Vazante (B), e correlação das unidades propostas por Oliveira (1998).....	22
Figura 2.5: Mapa geológico da região de Morro Agudo, Paracatu-MG (modificado de Dias <i>et al.</i> , 2018). ....	24
Figura 2.6: Zona de cisalhamento transpressional destal. a – afloramento de pelito muito intemperizado com venulações rompidas e <i>boudinadas</i> ; b – testemunho de sondagem de pelito esverdeado venulado. ....	24
Figura 2.7: Perfil geológico esquemático da Região de Morro Agudo. ....	25
Figura 3.1: Mapa Tectônico e localização da área. A – Localização da Faixa Brasília no contexto do cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim e Teixeira, 2017); B – Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck <i>et al.</i> 2005.....	29
Figura 3.2: Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000). ....	30
Figura 3.3: Mapa geológico da região de Morro Agudo, Paracatu-MG (modificado de Dias <i>et al.</i> , 2018). ....	31
Figura 3.4: Fotos das fácies <i>Plc</i> e <i>Rsa</i> . A – Pelito laminado ( <i>Plc</i> ) com finas lâminas de siltito (amostra intemperizada); B – Fotomicrografia de pelito laminado com variação na proporção de matéria carbonosa; C – Afloramento de ritmito silto-arenoso dobrado pertencente à fácies <i>Rsa</i> (afloramento a norte da área estudada, porém na mesma unidade); D – Fotomicrografia de ritmito com lâminas pelíticas e outras com areia muito fina. ....	36
Figura 3.5: Fotos das fácies <i>Dle</i> , <i>Dce</i> , <i>Pcc</i> , <i>Dim</i> e <i>Bim</i> . A – Fácies <i>Dle</i> com construções estromatolíticas; B – Fácies <i>Dce</i> com fragmentos de dolomito em matriz; C – Dolarenito cinza grosseiro (fácies <i>Dim</i> ); D – Fotomicrografia de <i>Dim</i> mostrando os intraclastos arredondados de	

oóides (Ool), pelóides (Pel) e fragmentos de dolarenito (Dar), envoltos em cimento dolomítico; E – Fotomicrografia de dolarenito microconglomerático com fragmentos arredondados de dolarenito (Dar) e pelóides (Pel); F – Brecha dolomítica com fragmentos angulosos de dolomito maciço e dolomito laminado (destaque em amarelo). .....	39
Figura 3.6: Fotos das fácies <i>Dia</i> , <i>Rpa</i> e <i>Dap</i> . A – Fácies <i>Dia</i> com fragmentos de dolomito cinza, alguns substituídos por sulfetos, em matriz argilo carbonática carbonosa; B – Fotomicrografia de <i>Dia</i> mostrando fragmento de dolarenito intraclástico (Dar) e matriz argilo carbonática carbonosa; C – Fácies <i>Rpa</i> com laminações silto-argilosas cinza esverdeadas e arenosas mais claras; D – Fácies <i>Dap</i> com rocha argilo carbonática carbonosa cinza escura; E – Estratos cruzados tabulares da fácies <i>Rpa</i> . .....	42
Figura 3.7: Fotos das fácies <i>Dlm</i> e <i>Dic</i> . A – Afloramento de <i>Dlm</i> laminado com porções cinza claro e escuro; B – Dolossiltito intensamente recristalizado com laminações irregulares de matéria carbonosa; C – Protomilonito carbonático com porfiroclastos autólitos; D – Dolarenito grosso cinza claro pertencente à fácies <i>Dic</i> ; E – Fotomicrografia de dolarenito intraclástico grosso com fragmentos compostos por peloides; F – Fotomicrografia de dolarenito totalmente substituído por sílica microcristalina, ainda preservando a textura da rocha original. ....	44
Figura 3.8: Seção estratigráfica do Grupo Vazante na região estudada. A – Localização de cada seção na topografia da região (seção composta A-A’; B – Correlação entre as Associações de fácies descritas nas seções estratigráficas. A base da fácies <i>Dic</i> foi usada como Datum. Perfis de sondagem compilados de Dias e Sotero, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d. ....	48
Figura 3.9: Modelo esquemático de evolução da Bacia Vazante. A – Representação simplificada das fácies sedimentares descritas e interpretadas do Grupo Vazante; B – Evolução dos estágios de deposição do Grupo Vazante. ....	50
Figura 4.1: Mapa Tectônico e localização da área. a – Localização da Faixa Brasília no contexto do Cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim & Teixeira, 2017); b – Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck <i>et al.</i> 2005. ....	55
Figura 4.2: Mapa geológico da região de Morro Agudo, Paracatu-MG (modificado de Dias <i>et al.</i> , 2018). ....	56
Figura 4.3: Coluna estratigráfica esquemática da região de Morro Agudo: litoestratigrafia, regime de sistemas, Associações de Fácies, fácies e os processos e ambientes de sedimentação (baseado em Sotero <i>et al.</i> , 2019). SIM – superfície de inundação máxima; SBRF – superfície basal de regressão forçada. ....	58
Figura 4.4: Fácies sedimentares do Grupo Vazante. a – Fotomicrografia de pelito laminado ( <i>Plc</i> ) com variação na proporção de matéria carbonosa; b – Amostra de dolomito estromatolítico ( <i>Dle</i> ); c – brecha dolomítica com clastos de dolomito maciços e laminados ( <i>Bim</i> ); d – Dolarenito oolítico ( <i>Dim</i> ); e – Diamictito com matriz argilosa e clastos dolomíticos ( <i>Dia</i> ); f – Ritmito silto-arenoso ( <i>Rpa</i> ); g – Dolomito laminado ( <i>Dlm</i> ); h – Dolarenito intraclástico ( <i>Dic</i> ). ....	59
Figura 4.5: Dispersão de resultados analíticos. a – Correlação $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ apresentados sobre campos compilados (Knauth & Kennedy, 2009). Os valores de $R^2$ representam os coeficientes de determinação das amostras de cada unidade; b – Razão Mg/Ca versus $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ ; c – $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ versus Mn/Sr indicando grau de alteração diagenética (Derry <i>et al.</i> , 1992); d – Valor de Mn versus $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ com <i>trend</i> de alteração (Bartley <i>et al.</i> , 2001). ....	66

Figura 4.6: Classificação dos dolomitos do Grupo Vazante baseada em relação $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VSMOW})}$ . Os valores apresentados de $\delta^{18}\text{O}$ são calibrados em relação ao padrão VSMOW, que podem ser calculados a partir do valor de $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ (Coplen <i>et al.</i> , 1983). .....	68
Figura 4.7: Seção quimioestratigráfica isotópica de dois testemunhos de sondagem (PSB-07 e PSB-08). RF: Regressão forçada; SBRF: Superfície basal de regressão forçada; SIM: Superfície de inundação máxima. ....	71
Figura 4.8: Distribuição dos resultados de $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ (representados em gráficos tipo <i>boxplot</i> ) obtidos nas formações Morro do Calcário, Serra da Lapa e Serra do Landim, e nos clastos dolomíticos dos diamictitos. ....	72
Figura 4.9: Curvas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ ( $\text{‰}_{\text{VPDB}}$ ) obtidas no Grupo Vazante. A interpretação da estruturação da sequencia pré-Vazante foi baseada em modelagem do embasamento magnético (Dias <i>et al.</i> , 2018). Figura fora de escala no eixo horizontal. ....	73
Figura 5.1: Coluna estratigráfica esquemática da região de Morro Agudo. ....	76
Figura 5.2: Seção quimioestratigráfica isotópica de dois testemunhos de sondagem (PSB-07 e PSB-08) na região de Morro Agudo. ....	78
Figura 5.3: Seção estratigráfica do Grupo Vazante na região de Morro Agudo (aproximadamente Norte-Sul). ....	80
Figura 5.4: Curvas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$ obtidas no Grupo Vazante. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Localizações geográficas e profundidades dos furos de sondagem utilizados nesse trabalho. As coordenadas UTM estão em metros e possuem Datum SAD-69, na zona 23S. ....	5
Tabela 1.2: Tabela com padrões internacionais de razão isotópica para carbono e oxigênio (Werner & Brand, 2001). ....	8
Tabela 1.3: Amostras de rocha coletadas para análises isotópicas. ....	10
Tabela 2.1: Trabalhos históricos realizados com foco no atual Grupo Vazante (baseado em Baia, 2013). ....	17
Tabela 3.1: Localizações geográficas e profundidades dos furos de sondagem utilizados nesse trabalho. As coordenadas UTM possuem Datum SAD-69, na zona 23S. ....	33
Tabela 3.2: Tabela-resumo da análise de fácies na região de Morro Agudo. ....	34
Tabela 4.1: Localizações geográficas e profundidades dos furos PSB-07 e PSB-08. As coordenadas UTM possuem Datum SAD-69, na zona 23S. ....	60
Tabela 4.2: Resultados químicos obtidos em carbonatos do Grupo Vazante. Mc – Formação Morro do Calcário; Lp – Formação Serra da Lapa; Sl – Formação Serra do Landim. ....	62
Tabela 4.3: Resultados das análises de isótopos estáveis (C e O) do furo PSB-07. Mc: Morro do Calcário; Lp: Serra da Lapa; Sl: Serra do Landim. ....	63
Tabela 4.4: Resultados das análises de isótopos estáveis (C e O) do furo PSB-08. Mc: Morro do Calcário; Lp: Serra da Lapa; Sl: Serra do Landim. ....	64

Tabela 4.5: Composição isotópica média das unidades, acompanhada dos valores mínimos e máximos, apresentadas como per mil (‰). Foi aplicado o teste de médias de Tukey, a nível de significância de 5%, para comparação entre as médias. .... 70

## RESUMO

Rochas do Grupo Vazante afloram no noroeste do estado de Minas Gerais, em uma faixa contínua de aproximadamente 250 km, da região de Vazante, a sul, até Unaí, a norte. Integra uma sequência argilo-carbonática de aproximadamente 5 km de espessura, que na região de Morro Agudo (Grupo Vazante Norte) é composta por doze fácies sedimentares e quatro associações de fácies (*AFs*), que indicam deposição em ambiente de margem passiva marinha mista. Foram descritas as fácies sedimentares em seis testemunhos de sondagem, e desses furos, dois foram amostrados em alta resolução para avaliação do grau de preservação das amostras, construção das curvas isotópicas ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ), e correlação estratigráfica regional. A associação de fácies basal (*AF01*) representa sedimentação em plataforma marinha profunda de baixa declividade, em regime de transgressão marinha. Após a inundação máxima, em trato de mar alto, depositou-se a *AF02* em ambiente de recife com barreiras em borda de plataforma. O abaixamento do nível relativo do mar possibilitou deposição da *AF03* em trato de sistema do estágio de queda. A *AF02* potencialmente serviu como área fonte para os diamictitos da *AF03*. A retomada da subida do nível relativo do mar proporcionou a deposição da *AF04* e ainda de rochas da *AF03* em posição mais distal. A *AF04* foi depositada em ambiente de plataforma marinha carbonática. O padrão de empilhamento observado sugere que a deposição de todas as unidades ocorreu progressivamente, em um ciclo quase completo de subida do nível relativo do mar (tratos transgressivos e mar alto), de queda e da retomada da subida (mar baixo). Apesar da pervasiva dolomitização dos carbonatos do Grupo Vazante ( $\text{Mg}/\text{Ca} > 0,5$ ) e hidrotermalismo frequente, a maioria das amostras pode ser classificada como dolomito pouco alterado, com algumas exceções, geralmente associada à Formação Serra do Landim ou a intervalo mineralizado no topo da Formação Morro do Calcário. Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  obtidos em amostras de dolomitos variam entre  $-4,57$  e  $2,52$  ‰<sub>VPDB</sub> e  $-11,07$  e  $-1,63$  ‰<sub>VPDB</sub>, respectivamente. Os perfis isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  gerados são marcados por valores predominantemente positivos para a Formação Morro do Calcário seguido por importante incursão negativa acima da fácies diamictito da Formação Serra da Lapa, e posterior tendência positiva para o topo. O melhor marcador quimioestratigráfico presente na sequência em todas as regiões é a forte incursão negativa na base da Formação Serra da Lapa. Os resultados isotópicos obtidos em amostras do Grupo Vazante Norte são coerentes com valores de carbonatos proterozoicos e as curvas isotópicas são passíveis de correlação com outras regiões do Grupo Vazante. Tendo como base essa correlação, infere-se que as porções Norte e Sul do Grupo Vazante foram depositadas em uma mesma bacia, ou em bacias com alguma conexão, possivelmente separadas (em parte) pela elevação do Rio Escuro.

**Palavras-chave:** Grupo Vazante; Dolomitos; Fácies sedimentares; Estratigrafia isotópica; Correlação estratigráfica.

## ABSTRACT

Vazante Group rocks outcrop in the northwest of Minas Gerais state, in a continuous belt of approximately 250 km, from the region of Vazante city, in the south, to Unaí city, in the north. It comprises a clay-carbonate sequence of approximately 5 km in thickness. In the region of Morro Agudo (Vazante Norte Group) is composed of twelve sedimentary facies and four facies associations (AFs), which indicate deposition in a carbonate-siliciclastic mixed marine passive margin setting. The sedimentary facies were described in six drill holes, and of two holes, were sampled at high resolution (3 m) to evaluate the preservation of the samples, construction of the isotopic curves ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ), and regional stratigraphic correlation. The most basal association (*AF01*) represents sedimentation in a deep marine platform of low slope angle, in a regime of marine transgression. After the maximum flood surface, in the highstand systems tract, the *AF02* was deposited in a reef setting with a barrier at the platform edge. The fall of the relative sea level led to the deposition of the *AF03* in a forced regressive systems tract. The *AF02* potentially served as source area for the carbonaceous diamictites of *AF03*. The return of the rise of the relative sea level provided the deposition of *AF04* and *AF03* rocks in a more distal position. The *AF04* were deposited in carbonate marine platform. The observed stacking pattern suggests that the deposition of all units occurred progressively, in an almost complete cycle of rising relative sea level (transgressive and highstand systems tracts), of falling sea level (forced regressive systems tract), and return of rising relative sea level (lowstand system tract). Despite the pervasive dolomitization of the Vazante Group carbonates ( $\text{Mg}/\text{Ca} > 0,5$ ) and frequent hydrothermalism, most of the samples can be classified as little altered dolostone, with some exceptions, generally associated with the Serra do Landim Formation or the mineralized range at the top of the Morro do Calcário Formation. The values of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  obtained in dolomite rocks range between -4,57 and 2,52 ‰<sub>VPDB</sub> and -11,07 and -1,63 ‰<sub>VPDB</sub>, respectively. The isotopic profiles of  $\delta^{13}\text{C}$  are characterized by predominantly positive values for the Morro do Calcário Formation followed by an important negative incursion above the diamictito facies, and positive trend towards the top. The best chemostratigraphic marker present in all regions is the strong negative incursion at the base of the Serra da Lapa Formation. The isotopic results of the Vazante Group North samples are consistent with the values of Proterozoic carbonates and isotopic curves can be correlated with other regions of Vazante group. Based on this correlation, it can be inferred that the North and South portions of the Vazante Group were deposited in the same basin, or in basins with some connection, possibly separated (partly) by the Rio Escuro elevation.

**Keywords:** Vazante Group; Dolostone; Sedimentary facies; Isotopic stratigraphy; Stratigraphic correlation.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 – Considerações iniciais

O presente trabalho de mestrado foi desenvolvido como parte do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sob orientação do professor Dr. Fabrício de Andrade Caxito. Parte das amostras e os dados utilizados foram levantados durante os projetos Faixa Brasília Sul e Paracatu-Unai, ambos do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), desenvolvidos nos anos de 2014, 2015 e 2016 nas regiões de Vazante e Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais. Os testemunhos de sondagem utilizados são de propriedade do SGB/CPRM e foram disponibilizados para o trabalho.

### 1.1.1 – Tema proposto

Estudo com foco na sedimentologia, ambientes deposicionais, estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio, e correlação regional das sequências metassedimentares do Grupo Vazante, hospedeiras de mineralizações sulfetadas de zinco e chumbo na região da Mina de Morro Agudo, município de Paracatu, noroeste de Minas Gerais.

## 1.2 – Estrutura da dissertação

Esse trabalho está organizado em sete capítulos principais, sumarizados abaixo:

1 – INTRODUÇÃO: apresentações iniciais do trabalho, abrangendo o tema, justificativas e objetivos do trabalho, localização e vias de acesso da área e os materiais e métodos;

2 – CONTEXTO GEOLÓGICO: apresenta o contexto geológico regional do Domínio Externo da Faixa Brasília e do Grupo Vazante, e mais especificamente da região de Morro Agudo;

3 – ANÁLISE DE FÁCIES E AMBIENTES DEPOSICIONAIS (Artigo 1): apresenta e discute os resultados do empilhamento estratigráfico, análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante, através do artigo “*Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais*”;

4 – QUIMIOESTRATIGRAFIA ISOTÓPICA (Artigo 2): apresenta e discute os resultados da avaliação da preservação da assinatura isotópica primária dos carbonatos, estratigrafia isotópica de alta resolução em dois testemunhos estratigráficos, e correlação estratigráfica do Grupo Vazante, através do artigo “*Estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa, topo do Grupo Vazante, na região do Morro Agudo*”;

5 – DISCUSSÕES – Discussões pontuais abordando os principais tópicos do trabalho;

6 – CONCLUSÕES GERAIS: sumariza as principais conclusões alcançadas no trabalho;

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: lista dos trabalhos consultados.

### 1.3 – Localização e vias de acesso

O objeto de estudo desse projeto corresponde a uma sucessão rochosa aflorante em área de aproximadamente 680 km<sup>2</sup>, situada na região Morro Agudo, a sul da cidade de Paracatu, e integralmente pertencente a esse município (Figura 1.1). Morro Agudo distancia 50 km de Paracatu e 97 km de Vazante, no noroeste do estado de Minas Gerais.

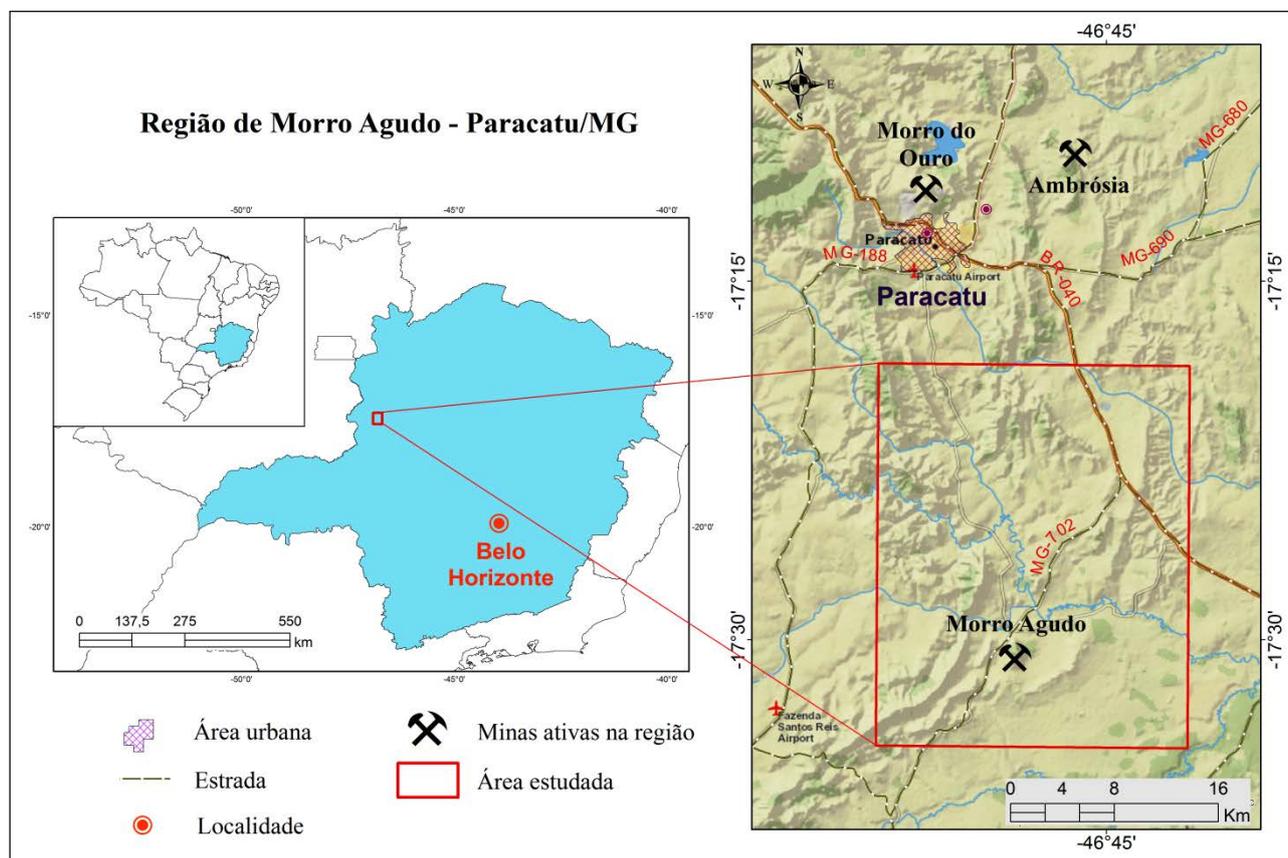


Figura 1.1: Localização da região de Morro Agudo.

A área é cortada na porção nordeste pela rodovia BR-040, o que facilita o acesso. Por essa rodovia, a área está localizada a 283 km de Brasília e 498 km de Belo Horizonte. Além disso, dentro da região está inserida a mina de Morro Agudo, de propriedade da *Nexa Resources*, que mantém boas estradas para o escoamento da produção. A principal delas, a MG-702, corta a área com direção SW-NE, desde Morro Agudo até a BR-040.

O polígono que limita a área possui vértices com os seguintes pares de coordenadas: 297217,0/8085575,0; 320156,0/8085575,0; 297217,0/8055928,0; 320156,0/8055928,0 (as coordenadas UTM estão em metros e possuem Datum WGS-1984, na zona 23S). A maior parte da área encontra-se inserida dentro de duas folhas ou quadrículas 1:100.000, com as porções centro e norte inseridas na folha Paracatu (SE-23-V-C-III) e a apenas a porção sul, na folha Arrenegado (SE-23-V-C-VI).

## **1.4 – Justificativa e objetivos**

### *1.4.1 – Justificativa e relevância*

Na região abordada nesse trabalho encontra-se localizada a mina de zinco e chumbo de Morro Agudo, que juntamente com os depósitos de Vazante e Ambrósia, todos dentro do Grupo Vazante, compõem a principal provincial produtora de zinco do país.

A Província Zincífera de Vazante é frequentemente alvo de estudos geológicos, geralmente abordando a caracterização e a gênese dos depósitos de metais base (*e.g.* Dardenne, 1979; 1998; 2000; 2001; Iyer *et al.*, 1992; Hitzman *et al.*, 1995; 1997; Misi., 1999, Cunha *et al.*, 2000; Paniago, 2011; Baia, 2013; Slezak, 2012; Slezak *et al.*, 2014), geocronologia e estudos isotópicos (Rodrigues, 2008; Santana, 2011; Rodrigues *et al.*, 2012), e a estratigrafia e o arcabouço estrutural, esses últimos principalmente na região de Vazante (Dardenne, 2000; Oliveira, 2013). O mapeamento geológico da região foi realizado entre os anos de 2010 e 2014, pelo Projeto Mapeamento 1:100.000 da Faixa Vazante-Paracatu do SGB/CPRM (Pinho *et al.*, 2017), porém possui cunho regional e não consegue dar o devido detalhe que a estratigrafia necessita.

Essa proposta foi motivada pela falta de estudos sistemáticos que descrevam e estabeleçam o empilhamento das fácies sedimentares na região de Morro Agudo, e sua correlação com outras regiões. Tendo ainda em vista os diferentes tipos de mineralizações e a grande variação faciológica entre as porções sul e norte do Grupo Vazante, esse estudo se torna ainda mais relevante. Para isso foi escolhida uma área compreendida entre o vilarejo de Morro Agudo e a cidade de Paracatu, que abrange a mina de Zn e Pb de Morro Agudo, a ocorrência de Zn e Pb de Bento Carmelo, e seis furos estratigráficos do SGB/CPRM.

Esse projeto visa à realização de um estudo com foco estratigráfico e sedimentológico das fácies sedimentares observadas no Grupo Vazante nas proximidades de Paracatu, salientando as notáveis diferenças com as descritas na região de Vazante. Assim os resultados podem contribuir para o entendimento das mineralizações de zinco e chumbo locais dentro do contexto das diferenças faciológicas na Bacia Vazante.

Visto que as formações Morro do Calcário e Serra da Lapa são conhecidas como hospedeiras de mineralizações de zinco e chumbo e ainda não foram focos de estudos estratigráficos sistemáticos na região, o detalhamento dessas sequências argilo-carbonáticas é de grande importância para o entendimento da metalogênese dos metais base na faixa.

### *1.4.2 – Objetivos*

Esse projeto de dissertação de mestrado teve como objetivo levantar seções litoestratigráficas e detalhar as características faciológicas do pacote argilo-carbonático do Grupo Vazante na região

de Morro Agudo, agrupando em Fácies e Associações de Fácies (AFs), e propondo o ambiente deposicional e a evolução da bacia. Teve ainda como objetivo a obtenção das curvas isotópicas (C e O) das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa e avaliação das mudanças das condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia Vazante. As curvas isotópicas podem servir de critério para correlação regional das unidades, e embasar discussões paleoambientais.

Em suma, o projeto pretende evoluir no conhecimento da Bacia Vazante, visando contribuir no entendimento da estratigrafia, sedimentologia e paleoambientes.

## **1.5 – Materiais e métodos**

### *1.5.1 – Revisão bibliográfica*

Buscando dar embasamento teórico para o trabalho, foi primeiramente realizada a revisão bibliográfica da geologia regional e local, e de temas pertinentes, como os seguintes: Faixa Brasília; Grupo Vazante; bacias sedimentares; sequências argilo-carbonáticas e depósitos minerais associados; petrografia e litogeoquímica de rochas sedimentares; análise de fácies e modelos deposicionais; estratigrafia de sequências; e quimioestratigrafia isotópica. Foram ainda compilados os dados de campo, de sondagem e de laboratório gerados pelo autor e equipe durante os trabalhos da SGB/CPRM na região, que serviram de base e foram motivadores para esse trabalho de mestrado.

### *1.5.2 – Levantamentos de campo*

Foram realizados cerca de 50 dias de campo na região da Faixa Vazante-Paracatu durante os projetos Faixa Brasília Sul e Paracatu-Unai do SGB/CPRM, entre os anos de 2014, 2015 e 2016. Especificamente, dentro da área de estudo foram realizados 130 pontos de campo e coletadas 90 amostras.

### *1.5.3 – Descrição da sondagem*

Os dados de sondagem utilizados nesse trabalho foram obtidos do Projeto de Sondagem Bambuí (PSB) (convênio DNPM/CPRM) realizado na década de 1980, com o objetivo de obter informações geológicas sobre as ocorrências de zinco em subsuperfície através da realização de sondagens estratigráficas (Brandalise *et al.*, 1980).

Foram reescritos seis testemunhos (PSB-05, PSB-06, PSB-07, PSB-08, PSB-09 e PSB-11), totalizando 5.911,95 metros de testemunho (Tabela 1.1), os quais se encontram armazenados na litoteca do SGB/CPRM em Caeté (LAMIN-CAETÉ).

Tabela 1.1: Localizações geográficas e profundidades dos furos de sondagem utilizados nesse trabalho. As coordenadas UTM estão em metros e possuem Datum SAD-69, na zona 23S.

<b>Furo</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Toponímia</b>	<b>Município/UF</b>
<b>PSB-05</b>	306575,0	8063808,0	1050,0	Mina de Morro Agudo	Paracatu/MG
<b>PSB-06</b>	305168,0	8063859,0	950,0	Oeste da Mina de Morro Agudo	Paracatu/MG
<b>PSB-07</b>	305182,0	8060269,0	900,0	Morro do Capão	Paracatu/MG
<b>PSB-08</b>	311164,0	8074116,0	953,2	Bento Carmelo	Paracatu/MG
<b>PSB-09</b>	302096,0	8083371,0	1056,2	Serra do Landim	Paracatu/MG
<b>PSB-11</b>	307259,0	8069772,0	1002,5	Carrapato	Paracatu/MG

Foram coletadas 291 amostras de rocha nos testemunhos. Os produtos das novas descrições e análises foram utilizados nesse trabalho (Dias & Sotero, 2017a; 2017b; 2017c; 2017d; 2017e).

#### *1.5.4 – Descrição petrográfica*

A confecção de lâminas delgadas foi realizada na litoteca do SGB/CPRM em Caeté (LAMIN-CAETÉ). Foram descritas 125 lâminas delgadas polidas, incluindo as amostras de campo e de testemunho.

#### *1.5.5 – Análise de fácies*

Os litotipos observados foram classificados como rochas sedimentares apesar da deformação sobreposta, que muitas vezes dificulta a observação de estruturas primárias. O caráter do metamorfismo baixo a muito baixo, possibilitou a descrição sob a ótica sedimentar para caracterização das fácies.

A análise de fácies, bem como o conceito de fácies utilizado, foi embasada pelas definições e sistemáticas de Reading (1986), Walker & James (1992) e Miall (1996; 2000). Segundo esses trabalhos, fácies são unidades rochosas (uma ou várias camadas) com características específicas, claras, observáveis e passíveis de serem medidas, que se formou em condições específicas de deposição. A determinação da escala de uma fácies varia de acordo com os objetivos do trabalho, o que por sua vez define o grau de detalhamento a ser adotado (Miall, 2000), devendo ser o mais simples possível.

A individualização das fácies foi realizada através da descrição das litofácies, estruturas sedimentares e geometria. Foram agrupadas fácies geneticamente correlacionadas em Associações de Fácies (AFs) e por fim, proposto um modelo deposicional e os paleoambientes (Figura 1.2). O código de cada fácies é composto por uma letra maiúscula indicando o litotipo principal, e duas minúsculas, expondo características particulares relevantes.

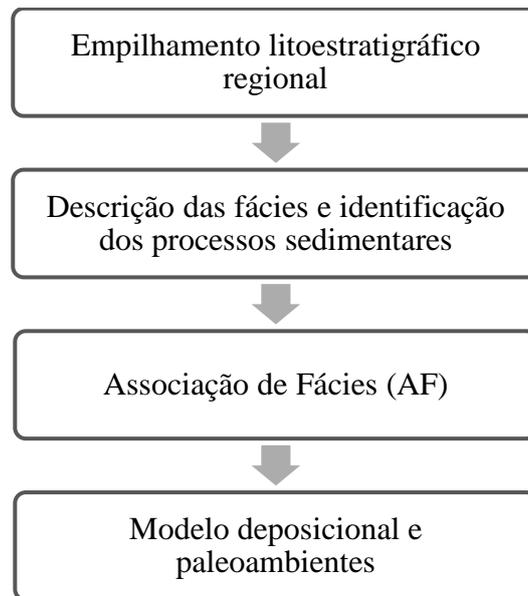


Figura 1.2: Fluxograma da metodologia utilizada na Análise de Fácies. Baseado em Reading (1986) e Walker & James (1992).

#### 1.5.6 – Análises químicas

Foram coletadas amostras de rocha durante as etapas de campo realizadas no decorrer dos projetos e das descrições das sondagens. Foram selecionadas amostras dos diversos litotipos presentes na região, com baixo grau de alteração intempérica e/ou hidrotermal. As amostras foram analisadas no laboratório analítico SGS GEOSOL.

Para a preparação, as amostras passaram por secagem, britagem e posterior pulverização a 150 *mesh* (0,106 mm). Foram analisadas por Fluorescência de Raios-X com fusão por Metaborato de Lítio, para determinação dos elementos maiores e ICP-OES/MS por digestão multiácida (1HCl/1HNO<sub>3</sub>/1HF/1HClO<sub>4</sub>) para determinação dos elementos traços.

Foram ainda utilizadas nesse projeto análises químicas pontuais e semi-quantitativas realizadas por Fluorescência de Raios-X portátil (FRXp) *Delta Olympus* (Dias & Sotero, 2017c; 2017d).

#### 1.5.7 – Estratigrafia isotópica

A estratigrafia isotópica é baseada na variação das concentrações de isótopos estáveis e radiogênicos ao longo de uma sucessão sedimentar. Nesse tipo de estudo, as medidas das concentrações das razões isotópicas de carbono, oxigênio e estrôncio ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) são as mais utilizadas e melhor estabelecidas na literatura. Nesse trabalho foram realizadas apenas análises de isótopos de C e O, uma vez que os resultados litoquímicos de Sr mostraram valores muito baixos, sendo em sua maioria, inferiores a 100 ppm. Halverson *et al.* (2007) sugerem que sejam

utilizadas amostras de carbonato com teores de Sr superiores à 300 ppm para análises isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

A variação medida das concentrações dos isótopos de C e O permite avaliar as mudanças das condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia de sedimentação da unidade na época da deposição. O perfil isotópico, associado à análise de fácies, permite fazer correlações estratigráficas intra e inter-baciais (Halverson *et al.*, 2005; 2010).

A aplicação de quimioestratigrafia isotópica tem se destacado no estudo de carbonatos antigos, principalmente do Proterozóico, visto a dificuldade de se encontrar registro fóssil que permita aplicar correlações cronoestratigráficas, e da complexidade da utilização de estromatólitos para tal fim. Para a aplicação da quimioestratigrafia para correlações regionais ou globais, deve-se garantir que as unidades estudadas tenham sido depositadas em uma mesma bacia ou em bacias com alguma conexão, onde foi possível a homogeneização isotópica (Halverson *et al.*, 2005).

As sequências carbonáticas marinhas são as rochas sedimentares mais estudadas por métodos de quimioestratigrafia isotópica, uma vez que marcam importantes mudanças climáticas e tectônicas globais. O estudo de carbonatos marinhos tem como fundamento o equilíbrio isotópico entre a água do mar e a rocha precipitada.

Além do pressuposto da homogeneização isotópica, para garantir a confiabilidade de um estudo quimioestratigráfico, deve-se identificar alterações pós-deposicionais do registro isotópico que podem lixiviar elementos. Comumente são utilizadas razões elementares que indicam alterações por diagênese, dolomitização, hidrotermalismo ou metamorfismo.

A quimioestratigrafia tem ganhado ainda mais relevância em estudos abordando as intensas variações climáticas ocorridas no Neoproterozoico, alternando períodos extremos glaciais e quentes (Kirschvink, 1992; Hoffman *et al.*, 1998). São descritos intervalos glaciais neoproterozóicos que parecem correlacionar sucessões sedimentares em todo o mundo, todos com incursões isotópicas positivas a negativas de  $\delta^{13}\text{C}$  (Jacobensen & Kaufman, 1999).

A correta interpretação dos dados isotópicos e da quimioestratigrafia dependem do conhecimento do fracionamento isotópico dos elementos no ambiente, no caso desse trabalho, no ambiente marinho.

#### 1.5.7.1 – Isótopos de carbono

O carbono é um elemento abundante na Terra, sendo o elemento básico da química orgânica e da vida. Está presente na biosfera, hidrosfera, atmosfera, crosta e manto da terra. É um elemento químico de número atômico 6 ( $Z = 6$ ), não metálico, que possui dois isótopos estáveis ( $^{12}\text{C} = 98,93\%$ ;  $^{13}\text{C} = 1,01\%$  – Rosman & Taylor, 1998) e um radiogênico ( $^{14}\text{C}$ ). Além desses, podem ser produzidos artificialmente os isótopos de massa 10, 11, 15 e 16.

Os isótopos artificiais ainda não possuem grandes aplicações práticas específicas conhecidas. O  $^{14}\text{C}$  é utilizado como parâmetro geocronológico em materiais do quaternário (meia vida igual a 5.730 anos). Já os isótopos estáveis  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ , através de suas razões, são amplamente utilizados em estudos geológicos, principalmente em rochas químicas ou bioquímicas (*e.g.* carbonatos).

Em estudos isotópicos de carbono em carbonatos é comum a utilização da razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (representada pela notação  $\delta^{13}\text{C}$ ) calibrada em relação a um padrão internacional conhecido, normalmente o VPDB (*Vienna Pee Dee Belemnite*) (Tabela 1.2).

Tabela 1.2: Tabela com padrões internacionais de razão isotópica para carbono e oxigênio (Werner & Brand, 2001).

Razão isotópica	Padrão	Valor padrão
$\delta^{13}\text{C}$	<i>Vienna Pee Dee Belemnite</i> (VPDB)	0,0111802
$\delta^{18}\text{O}$	<i>Vienna Standard Mean Ocean Water</i> (VSMOW) ou <i>Vienna Pee Dee Belemnite</i> (VPDB)	VSMOW = 0,0020052; VPDB = 0,0020672

Os valores da razão isotópica de C são apresentados em  $\delta^{13}\text{C}$  em partes por mil (‰), padronizados conforme a Equação (1).

$$\delta^{13}\text{C} = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{amostra} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{padrão}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{padrão}} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

O principal mecanismo de fracionamento do carbono nos oceanos é biológico. Os organismos fotossintéticos aquáticos consomem preferencialmente o isótopo  $^{12}\text{C}$  na fotossíntese, enquanto o  $^{13}\text{C}$  tende a permanecer na água. Portanto, carbonatos formados em bacias com elevada atividade biológica de organismos fotossintetizantes registram valores de  $\delta^{13}\text{C}$  superiores àqueles com baixa atividade.

Além da fotossíntese, existem outros mecanismos que atuam no fracionamento do carbono e que são relevantes em processos geológicos. Esses mecanismos podem ser responsáveis pelo enriquecimento ou empobrecimento de  $^{13}\text{C}$  nos oceanos. O Neoproterozoico é marcado por relevantes e recorrentes picos positivos e negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  registrados em carbonatos.

Os dados isotópicos de carbono obtidos em rochas do Mesoproterozoico e o Neoproterozoico possuem notáveis diferenças (Knoll *et al.*, 1986; Kaufman & Knoll, 1995; Buick *et al.*, 1995; Santos *et al.*, 2000, 2004; Alvarenga *et al.*, 2004). Os carbonatos mesoproterozoicos têm a característica de possuir valores de isótopos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ ) monótonos e próximos de 0 ‰. Já as rochas neoproterozoicas possuem valores com amplas variações, indo normalmente de -12 a +13‰. Essa elevada variação está associada principalmente aos grandes eventos climáticos e orogênicos ocorridos durante esse período, com os baixos valores de associados a eventos glaciais,

e os altos, aos eventos de deposição e soterramento de matéria orgânica nos oceanos (Knoll *et al.*, 1986). De acordo com Hoffman *et al.* (1998) e Kha *et al.* (1999), as grandes incursões positivas de  $\delta^{13}\text{C}$  estão relacionadas ao aparecimento ou superpovoamento de espécies, enquanto as negativas, a extinção ou mortalidade em massa.

Dados isotópicos de carbono são amplamente utilizados como ferramenta de correlação global de unidades carbonáticas neoproterozoicas. Porém, devido ao seu comportamento geoquímico nos oceanos, essa correlação pode ser imprecisa. Além disso, a diferença entre o tempo de residência no oceano e o de homogeneização do oceano sugere que a concentração de carbono da bacia pode ser bastante susceptível a processos locais.

#### 1.5.7.2 – Isótopos de oxigênio

O oxigênio também é um dos elementos mais abundantes da terra, compondo cerca de 21% em volume da atmosfera terrestre. É um elemento químico de número atômico 8 ( $Z = 8$ ), não metálico, que possui três isótopos estáveis ( $^{16}\text{O} = 99,757\%$ ;  $^{17}\text{O} = 0,038\%$ ;  $^{18}\text{O} = 0,205\%$  – Rosman & Taylor 1998).

Em estudos isotópicos de oxigênio em carbonatos é comum a utilização da razão  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  (representada pela notação  $\delta^{18}\text{O}$ ) calibrada em relação a um padrão internacional conhecido, que pode ser VPDB (*Vienna Pee Dee Belemnite*) ou VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) (Tabela 1.2). Os valores da razão isotópica de O são apresentados em  $\delta^{18}\text{O}$  em partes por mil (‰), padronizados conforme a Equação (2).

$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{amostra} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{padr\tilde{a}o}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{padr\tilde{a}o}} \right] \times 10^3 \quad (2)$$

A conversão de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (VPDB) versus  $\delta^{18}\text{O}$  (VSMOW), e vice-versa, pode ser feita pela Equação (3) (Coplen *et al.*, 1983).

$$\delta^{18}\text{O}_{(VSMOW)} = 1,03086 \times \delta^{18}\text{O}_{(VPDB)} + 30,91 \quad (3)$$

O mecanismo mais relevante de fracionamento isotópico de oxigênio nos oceanos é a evaporação. Nesse processo, o  $^{18}\text{O}$  fica preferencialmente na fase líquida enquanto o  $^{16}\text{O}$ , mais leve, evapora, causando o enriquecimento relativo da água do mar em  $^{18}\text{O}$ . Assim, os principais fatores relacionados às variações isotópicas de oxigênio na água do mar são a temperatura, salinidade, insolação solar, glaciações e outros eventos que afetem o ciclo de evaporação da água. Normalmente, quanto maior a temperatura na época de deposição, maior a taxa de evaporação, e mais positivos serão os valores de  $\delta^{18}\text{O}$ .

Segundo Jaffrés *et al.* (2007), os dados médios de  $\delta^{18}\text{O}$  em dolomita são superiores aos observados em calcita. Esses autores ainda descrevem que os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  decrescem com o aumento da idade em sedimentos carbonáticos marinhos.

O uso de isótopos de oxigênio deve ser feito com cuidado, uma vez que a assinatura isotópica em carbonatos é extremamente sensível a alterações relacionadas às percolações de fluidos, principalmente meteóricas.

### 1.5.7.3 – Análises isotópicas

Foram coletadas 214 amostras pontuais em dois testemunhos estratigráficos, sendo 118 no PSB-07 e 96 no PSB-08 (Tabela 1.3) para realização de análises de isotópicas de C e O. Os dois furos selecionados atravessam toda a sequência dolomítica das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa na região, onde o PSB-07 chega até a unidade basal do Grupo Vazante, a Formação Serra do Garrote. Os dois furos estão distanciados por 15 km em linha SW-NE.

Tabela 1.3: Amostras de rocha coletadas para análises isotópicas.

	Amostras			TOTAL
	Serra do Landim	Serra da Lapa	Morro do Calcário	
<b>PSB07</b>	0	61	57	<b>118</b>
<b>PSB08</b>	6	52	38	<b>96</b>
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>	<b>113</b>	<b>95</b>	<b>214</b>

Foram selecionadas amostras de rochas dolomíticas (*e.g.* dolarenitos e dolomito laminado) das unidades do Grupo Vazante com espaçamento em testemunho de 3 m (profundidade). Foram ainda coletadas 6 amostras de filito carbonático da Formação Serra do Landim para efeito de comparação e avaliação de alteração.

As amostras de rocha foram serradas perpendicularmente ao acamamento. Os domínios selecionados foram perfurados com o auxílio de uma furadeira de mesa convencional e broca  $\varnothing$  4,0 mm (Figura 1.3a e Figura 1.3b), e o pó resultante foi coletado, após rejeição do pó inicial (de superfície).

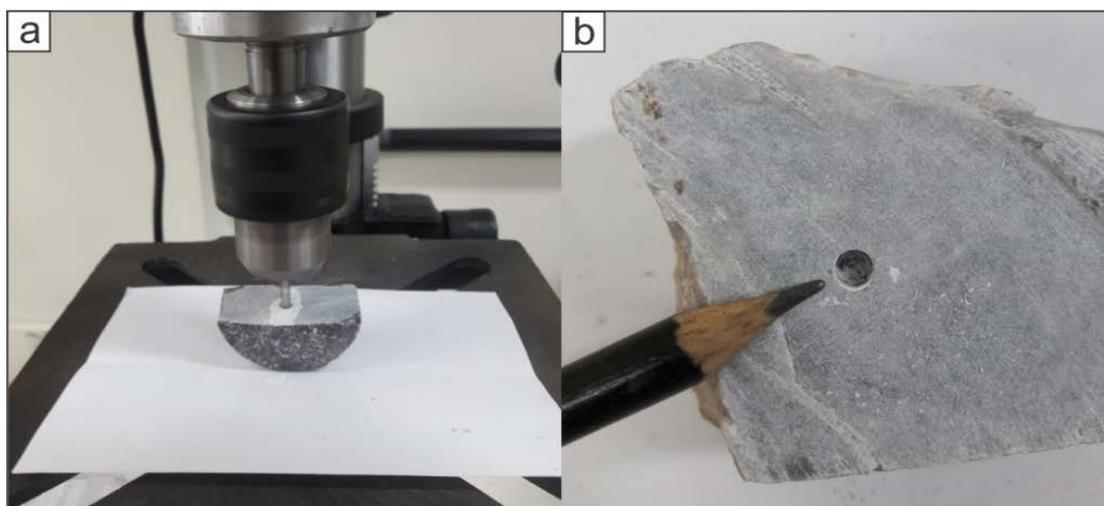


Figura 1.3: Amostragem de material para análises isotópicas. **a** – Furadeira de mesa; **b** – Local amostrado.

Para determinação das razões  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , foram amostrados aproximadamente 300  $\mu\text{g}$  de pó de rocha. A abertura química do material a ser analisado (pó de carbonato) foi feita utilizando-se  $\text{H}_3\text{PO}_4$  a 72 °C. As análises foram realizadas por espectrômetro de massa de fonte gasosa *Finnigan Gas Bench II* com a opção “carbonato”, que contém amostrador automático com preparação de amostra assistida e interface com *loop* de injeção, com sistema de fluxo contínuo acoplado ao espectrômetro de massa *Finnigan DELTA plus Advantage*. O erro associado é de 0,10 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$ , e de 0,05 ‰ para  $\delta^{13}\text{C}$ . As análises foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB).

#### 1.5.8 – Avaliação da alteração e seleção das amostras

A avaliação de alterações diagenéticas, hidrotermais e intempéricas, para seleção de amostras foi realizada com base na descrição macro e microscópica das rochas, e nos resultados das análises químicas e isotópicas.

As amostras foram serradas perpendicularmente ao acamamento para a avaliação macroscópica e escolha do local a ser amostrado. Isso ajudou na escolha de domínios carbonáticos homogêneos, livres de material siliciclástico, zonas silicificadas, mineralizadas ou hidrotermalizadas. Foram evitadas ainda regiões cortadas por falhas ou veios.

Em lâminas petrográficas distribuídas nos seis testemunhos de sondagem foram descritos os litotipos carbonáticos e os tipos de alteração presentes. Destacaram-se as alterações hidrotermais por silicificação e sulfetação (Figura 1.4a e Figura 1.4b). Tendo em vista as diversas zonas de alteração hidrotermal citadas, foram utilizados resultados pontuais de FRXp (Figura 1.4b) para seleção de carbonatos pouco alterados. Assim, foram evitados intervalos dolomíticos perfilados com valores anômalos de Si, S, Fe, Zn, Pb e Cu.

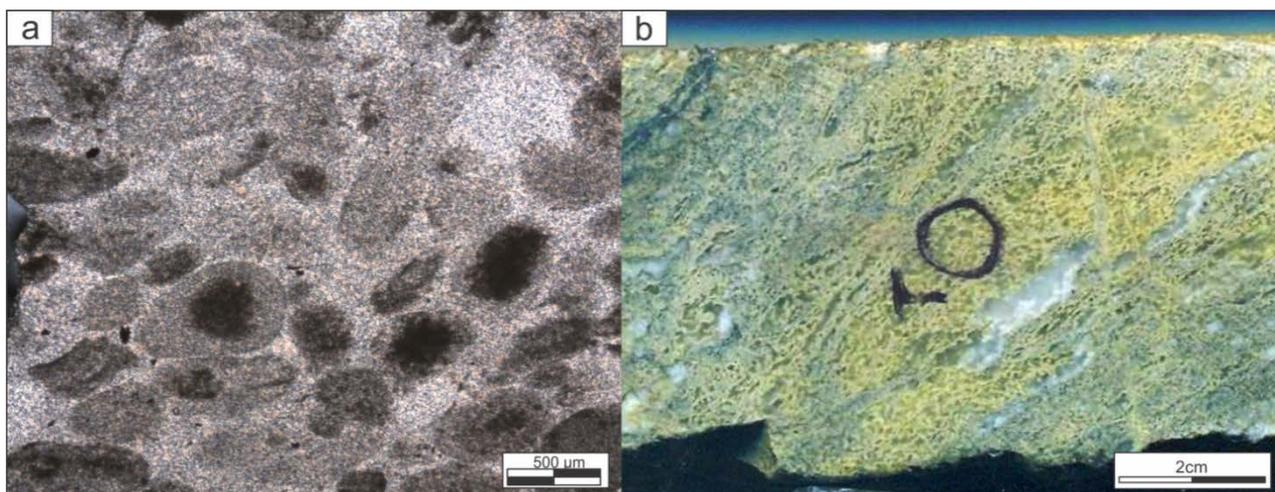


Figura 1.4: Amostras alteradas por hidrotermalismo. a – fotomicrografia de dolarenito totalmente substituído por sílica microcristalina, mantendo ainda a forma dos grãos; b – amostra de dolarenito silicificado, sulfetado e mineralizada em zinco (local da análise demarcado por um círculo).

Também foi evitada a coleta de carbonatos muito impuros, com elevada concentração de argilominerais e altos teores de Al, Si e Ti.

Para avaliar a dolomitização do carbonato, foram utilizados os resultados químicos obtidos em laboratório. A razão Mg/Ca foi utilizada para tratar o grau de dolomitização.

A avaliação das concentrações de estrôncio é de grande importância nos estudos em carbonatos. Os teores de Sr podem ser utilizados para compreender a natureza do fluido dolomitizante. Os baixos valores de Sr observados no Grupo Vazante sugerem que os fluidos dolomitantes eram depletados em estrôncio, provavelmente devido à contribuição de água meteórica (Azmy *et al.*, 2001).

Razões elementares de Sr/Ca, Mn/Sr e concentrações de Mn fornecem uma indicação sensível da diagênese, uma vez que, durante a troca com fluidos diagenéticos, Mn é comumente incorporado em carbonatos sedimentares, enquanto que o Sr é liberado da rede de carbonato (Brand & Veizer, 1980; Veizer, 1983; Kah, 1999). No entanto, estudos em diferentes unidades carbonáticas apresentaram resultados discrepantes quanto aos valores para amostras “bem preservadas” e “alteradas” (Azmy *et al.*, 2006).

Foi avaliado se o intervalo estudado continha concentrações de Sr suficientes para realização de análises isotópicas ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ), porém os resultados encontrados foram muito baixos (inferiores a 100 ppm), e as análises não foram realizadas.

A tendência linear de resultados observada em gráficos de dispersão  $\delta^{13}\text{C}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  pode ser utilizada para a avaliação da perda da assinatura isotópica primária de carbonatos. O sistema isotópico de precipitados marinhos é altamente influenciado pelas águas subterrâneas meteóricas durante a litificação, produzindo uma relação aproximadamente covariante entre  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  (Knauth & Kennedy, 2009). Os resultados observados para a Formação Serra do Landim estão

99,24% ajustados à linha de tendência. Já os resultados das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa estão pouco ajustados à tendência, 26,85% e 16,65%, respectivamente (Figura 1.5).

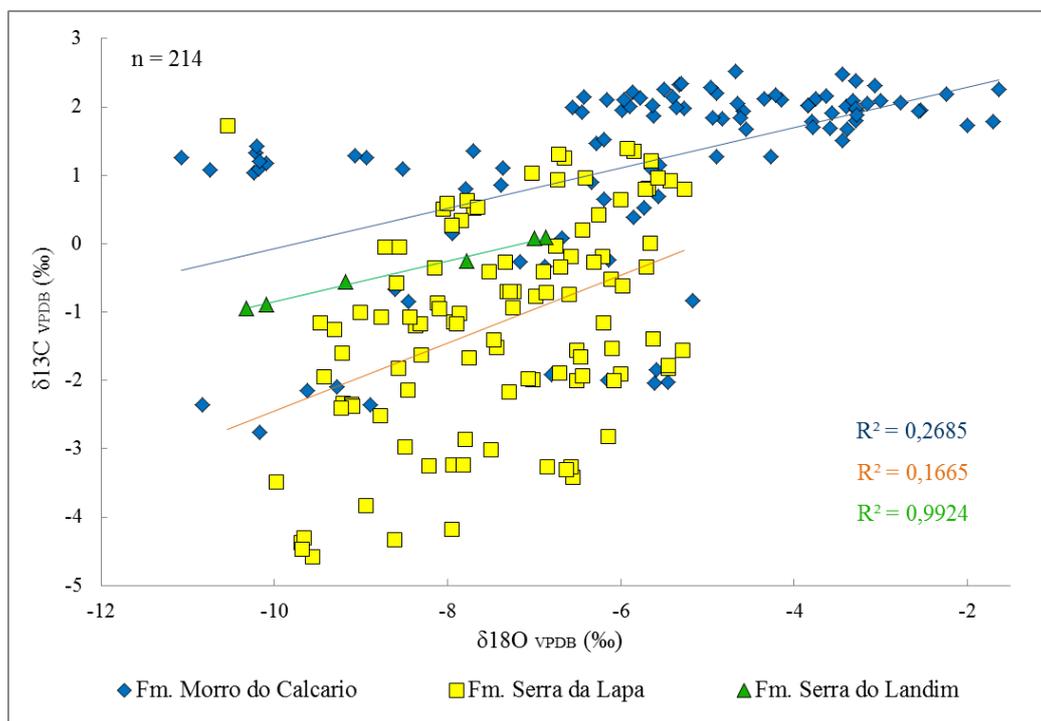


Figura 1.5: Dispersão dos resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  dos carbonatos (214 amostras). Os coeficientes de ajuste das linhas de tendência dos resultados ( $R^2$ ) de cada unidade estão indicados na figura.

O grau de preservação de amostras de carbonatos do Grupo Vazante também foi investigado por trabalhos anteriores (Azmy *et al.*, 2001; 2006; Monteiro *et al.*, 2007; Monteiro & Rubo, 2010; Oliveira, 2013; Cordeiro *et al.*, 2018) em procedimentos que envolveram petrografia e geoquímica elementar e isotópica. Nesses trabalhos foram observadas rochas preservadas e outras alteradas. Essas últimas principalmente por processos de dolomitização e hidrotermais.

#### 1.5.9 – Integração dos dados e análise estatística

Os dados geológicos gerados durante as etapas de campo e descrição dos testemunhos, conjuntamente com os dados petrográficos, químicos e isotópicos foram devidamente tratados com uso dos *softwares* Excel 2010, ArcGis 10.2 e CorelDraw X5.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado com o auxílio dos *softwares* Excel 2010 e Minitab 18. Foram construídos gráficos de dispersão de duas variáveis, relacionando dados isotópicos e químicos. Também foi construído gráfico tipo *boxplot* para representar a distribuição dos valores das razões isotópicas em cada unidade estudada.

A análise de comparação entre os resultados isotópicos médios de cada unidade foi realizada com base no teste de médias de Tukey, a um nível de significância de 5%, onde os resultados médios seguidos pelas mesmas letras não diferem entre si a este nível de significância.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A região abordada nesse trabalho de mestrado está inserida no grande domínio da Província Tocantins, definida como um sistema orogênico colisional localizado na região central do Brasil (Almeida *et al.*, 1968; 1977). Representa um orógeno de grandes dimensões desenvolvido no Neoproterozoico com a aglutinação de três cratons: Amazônico, São Francisco e Paranapanema/Rio de La Plata (Dardenne, 2000). Fazem parte da Província Tocantins as faixas Brasília, Araguaia e Paraguai. Nesse trabalho será apresentada a Faixa Brasília, com maior ênfase nos Domínio Externo (Fuck, 1994) e Cinturão de Dobras e Empurrões (Fuck *et al.*, 2005), onde se encontra inserida a região de Paracatu.

### 2.1 – Faixa Brasília

A Faixa Brasília possui estruturação aproximadamente norte-sul, margeando os limites ocidentais do Cráton São Francisco (Figura 2.1a), desde o sul de Minas Gerais até o norte de Tocantins, passando por Goiás e Brasília (Almeida *et al.*, 1977).

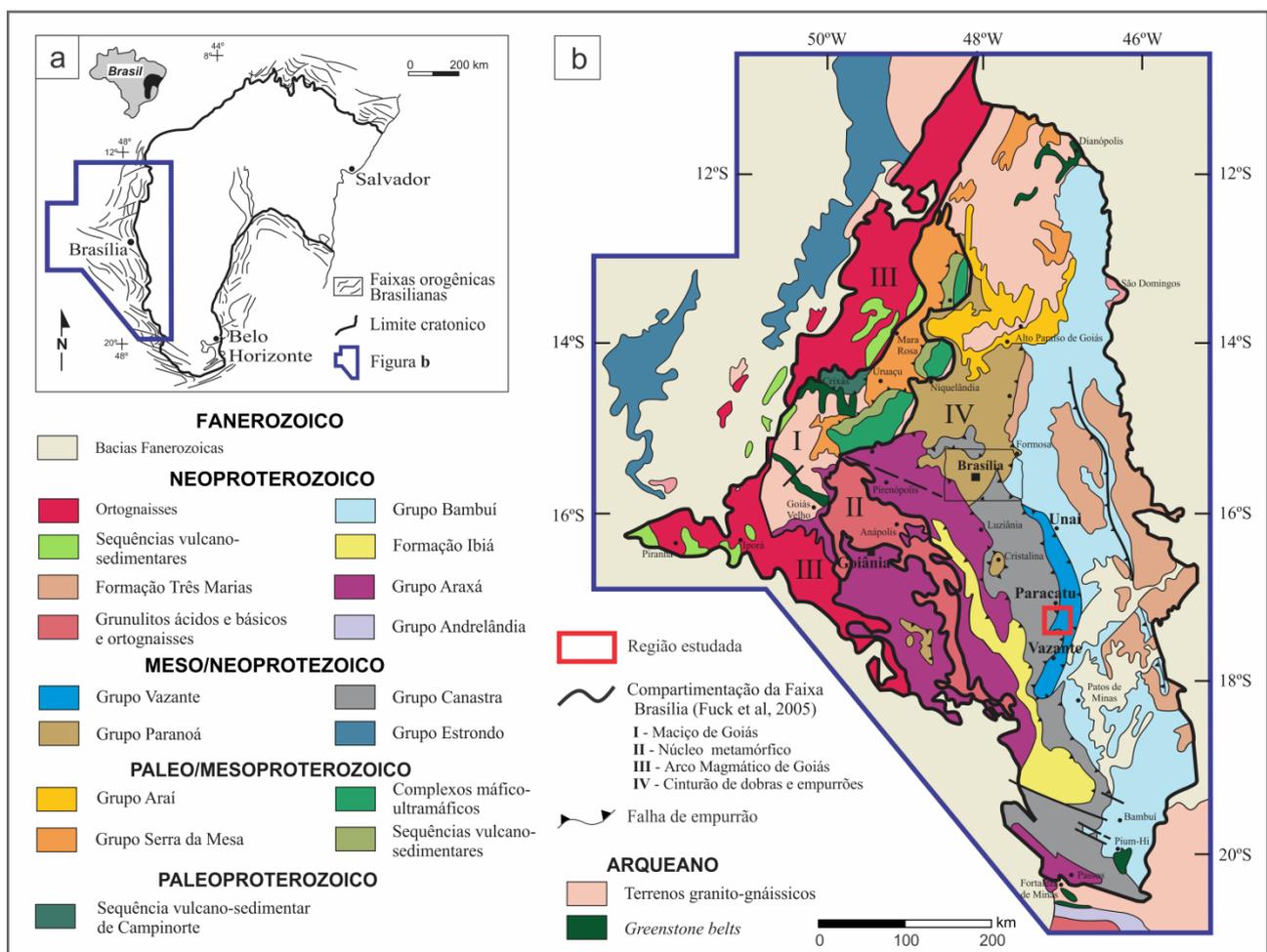


Figura 2.1: Mapa Tectônico e localização da área. a – Localização da Faixa Brasília no contexto do cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim & Teixeira, 2017); b – Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck *et al.* 2005.

A Faixa Brasília é um domínio heterogêneo em relação aos tipos litológicos e ao grau de metamorfismo. A deformação e o metamorfismo são mais intensos a oeste e decresce em direção a leste. Baseados nisso, Fuck *et al.* (1993; 1994) dividiram a faixa em três zonas: Arco Magmático de Goiás, Zona Interna e Zona Externa. Posteriormente, Fuck *et al.* (2005) propõem uma nova divisão, onde subdivide o Domínio Interno em Maciço de Goiás (I) e Núcleo Metamórfico (II), mantêm a delimitação e nomenclatura do Arco Magmático de Goiás (III), e engloba o Domínio Externo e a Zona Cratônica deformada, no Cinturão de Dobras e Empurrões (IV) (Figura 2.1b).

O Maciço de Goiás (I) é composto por unidades granito-*greenstone* possivelmente aglutinadas durante a orogenia neoproterozoica, e por embasamento também de composição granito-*greenstone* arqueano metamorfizado em fácies xisto verde. Possui idades entre 2.8 e 2.6 Ga (Queiroz, *et al.*, 1998). As sequências *greenstone belts* são denominadas Crixás, Guarinos, Pilar de Goiás, Faina e Santa Rita.

O Núcleo Metamórfico (II) é composto por complexos granulíticos de composição máfica-ultramáfica e tonalítica a granodiorítica, e complexos máficos-ultramáficos acamadados associados a sequências vulcano-sedimentares. Os complexos máficos-ultramáficos acamadados são, de sul para norte, Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava.

O Arco Magmático de Goiás (III) representa o testemunho da fase pré-colisional da subducção de crosta oceânica e possui assinatura juvenil de idade neoproterozoica. Indica ter ocorrido magmatismo pré-colisional em 900 Ma, e se estendeu até 640 Ma, e tardi a pós-colisional entre 600 e 480 Ma (Valeriano *et al.*, 2004).

O Cinturão de Dobras e Empurrões (IV) é composto por sequências sedimentares metamorfizadas em baixo grau, envolvidas na deformação brasileira, dobradas e empurradas com vergência para leste. Compõem um complexo de *nappes* e cavalgamentos com transporte tectônico em direção ao Craton São Francisco (Dardenne, 2000). Essas sequências supracrustais são compostas por vários grupos, dentre eles o Ibiá, Paranoá, Canastra, Vazante, e a porção deformada do Grupo Bambuí.

A região de Morro Agudo encontra-se inserida na porção centro-sul da Faixa Brasília, localizada na borda oeste do Cráton São Francisco (Figura 2.1a) (Almeida, 1967; 1968; 1977; Dardenne, 2000; Valeriano *et al.*, 2004). Faz parte do Domínio Tectônico da Zona Externa da Faixa Brasília e do Cinturão de Dobras e Empurrões, e é caracterizada por cinturão de dobras e cavalgamentos com vergência para leste (Fuck, 1994; Fuck *et al.*, 2005). Nesse contexto, pertence à porção mais externa do orógeno, junto ao limite cratônico, e é composta por sequências metassedimentares pertencentes aos grupos Vazante e Canastra (Figura 2.1b) (Dardenne, 2000). O objeto de estudo desse trabalho de mestrado é o Grupo Vazante.

## **2.2 – Grupo Vazante**

### *2.2.1 – Trabalhos anteriores no Grupo Vazante*

A região de ocorrência do Grupo Vazante é frequentemente alvo de pesquisas geológicas, principalmente após as descobertas de mineralizações de zinco por Ângelo Solis em 1933, primeiro de zinco silicatado na região da cidade de Vazante, e posteriormente de zinco e chumbo sulfetados em Morro Agudo, no município de Paracatu.

Desde então, diversos pesquisadores realizaram relevantes trabalhos na região, com destaque para as pesquisas desenvolvidas pelo Professor Dardenne, sendo um deles o que definiu a sequência Vazante como grupo, composto por sete formações (Dardenne, 2000). Hoje, com o apoio de estudos geocronológicos e estratigráficos recentes, admite-se que o Grupo Vazante é composto por cinco formações, excluindo-se as até então unidades basais (Santo Antônio do Bonito e Rocinha) e as correlacionando ao Grupo Bambuí (Misi *et al.*, 2011; Signorelli *et al.*, 2013).

Um breve resumo dos trabalhos históricos desenvolvidos no Grupo Vazante desde o ano de 1933, com foco principal na estratigrafia, pode ser observado na tabela Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Trabalhos históricos realizados com foco no atual Grupo Vazante (baseado em Baia, 2013).

TRABALHOS	CONTRIBUIÇÃO
<b>Ângelo Solis (1933)</b>	Identificação do minério de Zinco (calamina) em Vazante.
<b>Luciano J. Morais (1955)</b>	Primeira publicação científica sobre a Jazida de Vazante no IX Congresso Brasileiro de Geologia.
<b>Branco &amp; Costa (1961), Braun, (1968), Barbosa (1965)</b>	Incluíram as rochas aflorantes na região de Vazante/Paracatu ao Grupo Bambuí.
<b>Amaral (1968)</b>	Identificou na região de Vazante os grupos Canastra, Bambuí e Bambuí, e depósitos recentes.
<b>Cassedanne (1968)</b>	Realizou os primeiros estudos dos ambientes de sedimentação na região de Vazante.
<b>Dardenne (1974)</b>	Descreveu quatro fácies na região de Vazante: e as correlacionou com o Grupo Bambuí.
<b>Madalosso &amp; Valle (1978)</b>	Descrevem sistematicamente três grandes unidades, correlacionando-as à Formação Paraopeba.
<b>Leal et al. (1978)</b>	Descrevem as rochas carbonáticas separando-as em três fácies: <i>fore reef</i> , <i>reef</i> e <i>back reef</i> . Correlacionam estas fácies também à Formação Paraopeba.
<b>Dardenne (1978a)</b>	Individualizou a Formação Vazante, subdividida nos membros Morro do Calcáreo, Serra do Poço Verde e Serra do Garrote, mantendo a correlação tradicional com o Grupo Bambuí.
<b>Madalosso (1979)</b>	Subdividiu a Formação Vazante em seis fácies (Serra do Garrote, Morro do Calcáreo, Serra do Velosinho, Serra da Lapa, Serra do Landim e Morro Agudo).
<b>Madalosso (1980)</b>	Fez considerações sobre a paleogeografia na região de Paracatu.
<b>Campos Neto (1984)</b>	Dividiu as seqüências terrígenas e dolomíticas em três zonas: Zona de Paracatu, Zona de Vazante e Zona das Ardósias. Tais zonas são correlacionadas ao Grupo Paranoá.
<b>Rigobello et al. (1988)</b>	Redefinem a Formação Vazante, elevando o Membro Serra do Garrote à categoria de formação. As fácies Serra do Landim, Velosinho e Serra da Lapa foram agrupadas na Formação Lapa.
<b>Freitas-Silva &amp; Dardenne (1992)</b>	Descreve o empilhamento estratigráfico das Formações Vazante na região de Paracatu.
<b>Larangeiras (1992)</b>	Descreve as formações Serra do Garrote e Lapa presentes na região de Unaí e as correlacionam com o Grupo Paranoá.
<b>Dardenne et al. (1997)</b>	Definem como unidades inferiores da Formação Vazante um conglomerado basal, denominado Membro Arrependido, e uma fácies dolomítica, denominada Membro Lagamar.
<b>Dardenne et al. (1997)</b>	Apresentam uma divisão em unidades, posicionando os importantes depósitos de fosforitos das regiões de Coromandel, Rocinha e Lagamar na porção basal da Formação Vazante.
<b>Dardenne et al. (1998)</b>	Identificam cinco grandes unidades: Unidade Psamo Pelítica Inferior de Coromandel, Unidade Psamo Metapelito Carbonatada de Lagamar, Unidade Pelítico Intermediária da Serra do Garrote, Unidade Argilo Dolomítica de Vazante-Paracatu-Unaí e Unidade Superior da Serra da Lapa.
<b>Termerid Mineração in Oliveira (1998)</b>	Os geólogos da Termerid Mineração definiram um empilhamento estratigráfico informal para a região de Paracatu, da base para o topo, nos membros Retiro, Mocambo e Santa Rita.
<b>Oliveira (1998)</b>	Propôs a correlação entre as unidades descritas na região de Paracatu e as descritas em Vazante.
<b>Dardenne (2000)</b>	Eleva a Formação Vazante à grupo com as formações Retiro, Rocinha, Lagamar, Serra do Garrote, Serra do Poço Verde, Morro do Calcáreo e Serra da Lapa.
<b>Dardenne (2001)</b>	Renomeia a formação basal do Grupo Vazante (Formação Retiro) como Santo Antônio do Bonito.
<b>Azmy et al. (2006; 2008)</b>	Descreve um evento glacial na base da Formação Serra da Lapa.
<b>Rodrigues (2008); Rodrigues et al. (2012)</b>	Conclui que a maioria dos grãos de zircão do Grupo Vazante apresentam idades U-Pb paleo e mesoproterozóicas, sendo uma pequena população neoproterozóica encontrada em amostras das formações basais Santo Antônio do Bonito e Rocinha (935±14 Ma).
<b>Misi et al. (2011); Signorelli et al. (2013); Pinho et al. (2017)</b>	Propõe que a parte basal do Grupo Vazante, representada pelas formações Santo Antônio do Bonito e Formação Rocinha, seria parte do Grupo Bambuí.
<b>Santanna (2011)</b>	Propõe ambiente de deposição em plataforma carbonática mista para o topo do Grupo Vazante. Sugere com base em dados de Sm-Nd que a Formação Lapa representa os primeiros registros do front de empurrão da Faixa de Dobramentos Brasília.
<b>Oliveira (2013)</b>	Subdivide o pacote carbonático que hospeda o depósito de Zn de Vazante em 6 associações de facies que permitiram a reconstrução paleoambiental da sucessão carbonática.

### 2.2.2 – Faixa Vazante

A faixa de ocorrência das rochas metassedimentares de baixo grau do grupo Vazante, denominada Faixa Vazante (Dardenne *et al.*, 1998; Dardenne, 2000), estende-se por cerca de 250 km na direção N-S, com largura variando de 25 a 30 km, e pode ser dividida em dois domínios, norte e sul, separados pela inflexão do Rio Escuro (Figura 2.2). Essa inflexão também faz a separação entre os domínios de ocorrência de mineralizações de zinco silicatado (sul) e sulfetado (norte), e ainda das principais unidades hospedeiras.

Ao longo da Faixa existem vários depósitos e ocorrências de metais hospedados em rochas metassedimentares. Isso confere a região uma grande importância nacional na extração de metais. No Grupo Vazante, destacam-se as minas de metais base de Vazante (Zn), Morro Agudo (Zn, Pb) e Ambrósia (Zn) (a última em processo de abertura), e as ocorrências de Bento Carmelo, Santa Rita e Fagundes. São conhecidas várias ocorrências de malaquita na Formação Serra do Landim. Já na base do Grupo Canastra, na Formação Paracatu, está hospedada a mineralização de uma das maiores minas de ouro do Brasil, a Mina de Morro do Ouro (Au), e ainda o depósito da Fazenda Lavras (Au).

O Grupo Vazante aflora desde a cidade de Lagamar, a sul, passando por Vazante e Paracatu, até Unaí, no norte. As unidades que compõem o grupo estão dispostas em faixas alongadas com direção geral N-S, com variação das altitudes na região do Rio Escuro. A sul do Rio Escuro, as camadas infletem para direção NW-SE, e a norte para NE-SW (Figura 2.2). Matos (2016) interpreta que a inflexão do Rio Escuro representa um alto estrutural com grande influência na arquitetura das unidades em superfície. Adicionalmente, Dias *et al.* (2018) sugerem que a estruturação das unidades é influenciada por estruturas profundas de altos e calhas do embasamento magnético. Na região de Morro Agudo, as estruturas profundas que aparentemente exercem maior influência na estruturação em superfície das unidades são o Alto do Rio Escuro e o Baixo de Paracatu.

As camadas estão estruturadas por falhas inversas e de empurrão, e dobras assimétricas com vergência para leste, e afetadas por falhas normais tardias. A maior parte das falhas convergentes é de baixo ângulo, compondo contatos e duplicamentos tectônicos. As falhas de baixo ângulo associadas a dobramentos, possibilitam a formação de *klippen* sinformes. Ocorrem também falhas de alto ângulo, possivelmente geradas pela inversão de falhas normais. Isso acontece principalmente no contato entre as formações Serra do Garrote e Morro do Calcário, quase sempre de alto ângulo.

Apesar da deformação, hidrotermalismo e metamorfismo sobrepostos, Dardenne (2000) descreve que as relações estratigráficas permaneceram bem preservadas.

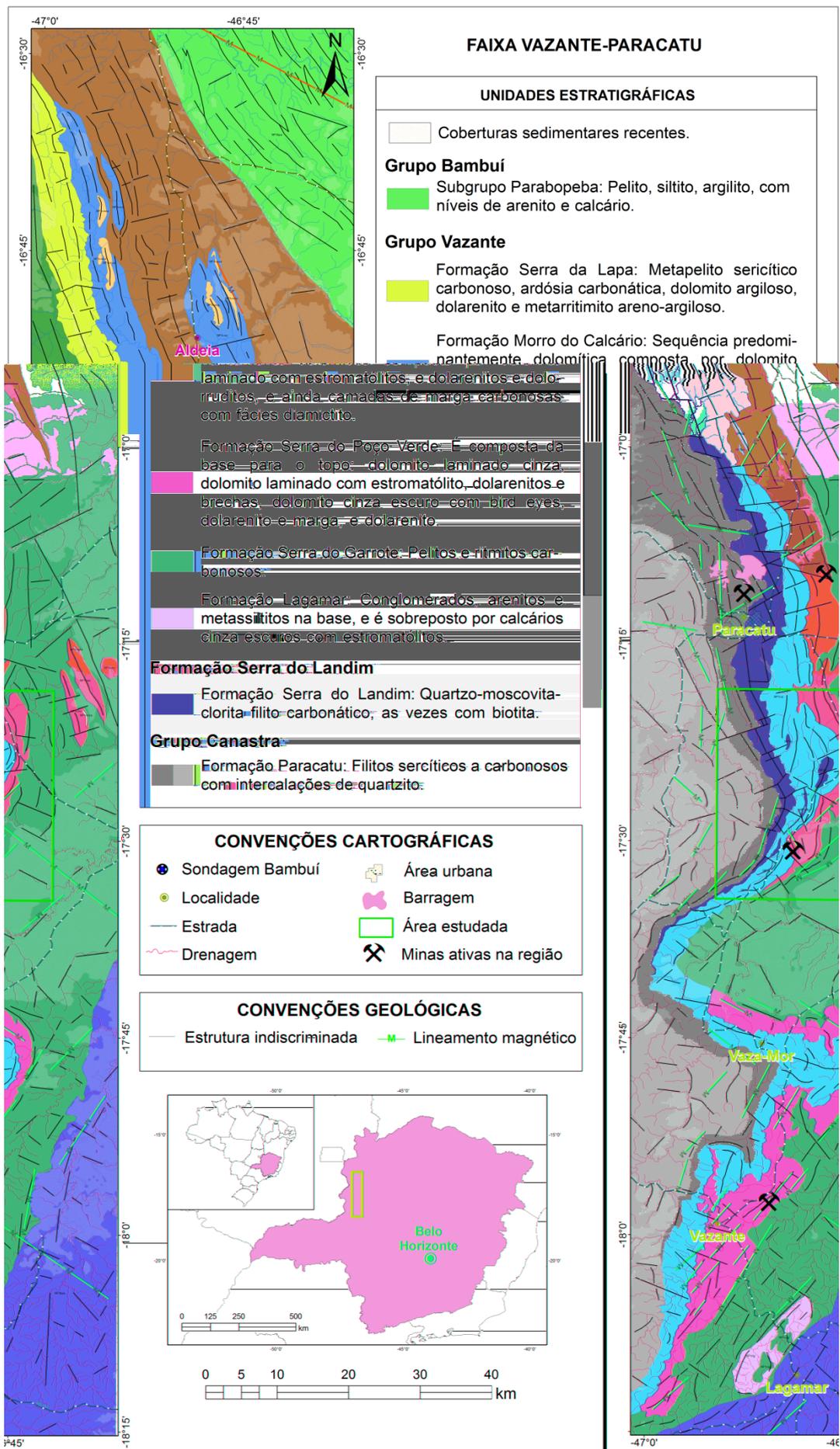


Figura 2.2: Mapa geológico simplificado da Faixa Vazante (Baseado em Dias *et al.*, 2018).

### 2.2.3 – Estratigrafia

Dardenne (2000) definiu o empilhamento estratigráfico do Grupo Vazante, principalmente com base em dados levantados na região da cidade de Vazante, a sul da Inflexão do Rio Escuro (Figura 2.3). Nessa região existem vários trabalhos que balizam o entendimento da estratigrafia e das mineralizações (e.g. Dardenne, 1998; 2000; 2001; Monteiro, 1997; 2002; Oliveira, 2013; Baia, 2013).

Grupo	Formação	Membro	Descrição e depósitos/ocorrências minerais associadas	
VAZANTE	Serra da Lapa	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas e lentes de dolomitos	
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas	
	Morro do Calcário	Pamplona Superior	Bioherma estromatolítica, fácies de brechas e dolarenitos Depósitos minerais: Morro Agudo, Fagundes e Ambrósia	
			Dolomitos rosados com esteiras estromatolíticas, nódulos de barita e gretas de ressecamento	
	Serra do Poço Verde	Pamplona Inferior	Ardósias cinza a verde com intercalações de dolomitos rosados Depósito mineral: Vazante	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-escuros com esteiras estromatolíticas e <i>birds eyes</i>	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-claros a rosados com intercalações de brechas e dolarenitos	
		Serra do Garrote	Ardósias cinzas com lentes de quartzitos esporádicas	
	Lagamar	Sumidouro	Bioherma estromatolítica	
			Calcários cinza-escuros e brechas dolomíticas	
Arrependido		Conglomerados		
BAMBUÍ	Rocinha	Ritmitos Depósito mineral: Lagamar - fosforito		
		Ardósias cinza-escuras, piritosas e fosfatadas Depósito mineral: Rocinha - fosforito		
	Santo Antônio do Bonito	Ritmitos Intercalações de quartzitos, fosforitos, diamictitos e ardósias Ocorrência mineral: Coromandel - fosforito		

Figura 2.3: Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000). As formações Santo Antônio do Bonito e Rocinha foram correlacionadas com unidades do Grupo Bambuí (Misi *et al.*, 2011; Signorelli *et al.*, 2013).

A Formação Santo Antônio do Bonito foi definida como a base do Grupo Vazante (Dardenne, 2000), porém trabalhos posteriores (Misi *et al.*, 2011; Signorelli *et al.*, 2013) a reposicionaram

estratigraficamente e a correlacionaram ao Grupo Bambuí. Aflora apenas na região sul, próximo a cidade de Coromandel. Na Figura 2.2, essa formação está cartografada como pertencente ao Grupo Bambuí, juntamente com a Formação Rocinha. É constituída por metarenitos claros com níveis conglomeráticos, intercalados com níveis pelíticos ardosianos e fosforitos. Na região dos rios Santo Antônio do Bonito e Santo Inácio ocorrem horizontes de diamictitos com clastos de quartzito, calcário, dolomito, metassiltito e granitoide, em matriz pelítica.

A Formação Rocinha está posicionada acima da Formação Santo Antônio do Bonito e também foi correlacionada ao Grupo Bambuí. É composta por uma sequência rítmica areno-pelítica na base, seguida por ardósias escuras fosfatadas e passa verticalmente para pelitos carbonáticos e ritmitos no topo. Na porção de meio dessa formação está hospedado o depósito de fosforito da Rocinha, e na porção superior, o depósito de fosfato de Lagamar, constituído essencialmente por fosfarenitos.

Atualmente, interpreta-se a Formação Lagamar como a base aflorante do Grupo Vazante. Aflora na região da cidade de Lagamar com forma de ocorrência em mapa próxima a de uma elipse (Figura 2.2). É composta, na base, por alternância de ortoconglomerado com matriz areno-siltosa, arenito, siltito e ardósia, representantes do Membro Arrependido. Brechas dolomíticas se sobrepõem a esta intercalação, seguidos por horizontes de calcários cinza escuros com intercalações de brechas lamelares e finalmente dolomiticos estromatolíticos pertencentes ao Membro Sumidouro. Esse último compõem *biohermas* do gênero *Conophyton metula* (Cloud & Dardenne, 1973).

Acima, ocorre um pacote homogêneo de pelito negro, carbonoso, finamente laminado e com intercalação de lâminas e camadas de ritmito silto-arenoso, também carbonoso, e de esparsas lentes de arenito fino a médio. Esse pacote corresponde à Formação Serra do Garrote, que aflora desde a região de Lagamar, a sul, até Unaí, a norte (Figura 2.2). A espessura total inferida dessa unidade ultrapassa os 1.000 m (Madalosso & Valle, 1978; Dardenne, 1978).

A Formação Serra do Poço Verde compõe a principal unidade carbonática aflorante na região de Vazante. É subdividida nos seguintes membros:

- Membro Morro do Pinheiro Inferior: dolomito cinza-claro a rosado, maciço ou com laminações microbiais, dolarenito, por vezes oncolíticos, brecha lamelar e lentes de estromatólitos colunares;
- Membro Morro do Pinheiro Superior: dolomito cinza a cinza escuro com estruturas *bird-eyes* e laminações planas e convolutas. Níveis de dolarenitos, brechas lamelares e pelito carbonosos podem ocorrer;
- Membro Pamplona Inferior: pelito carbonático cinza-claro, rósea a esverdeada, com níveis dolomíticos finos;

- Membro Pamplona Médio: dolomito cinza-claro a rosado, com biolaminações, intercalado com dolarenito, brecha e estromatolitos colunares.

A Formação Morro do Calcário é composta por dolomitos cinza a róseo, estromatolítico constituindo *bióstromos* e *biohermas*, com colunas de laminações convexas, associados a dolarenito e dolorudito. Essa unidade é bem definida e cartografada na região de Morro Agudo e em direção a norte (Figura 2.2). Na região de Vazante compõe uma estreita faixa acima da Formação Serra do Poço Verde (Oliveira, 2013).

O topo do Grupo Vazante é representado pela Formação Serra da Lapa, que recobre em toda região os dolomitos da Formação Morro do Calcário. É composta por diamictito argiloso na base, pelitos carbonáticos carbonosos, siltitos carbonáticos, lentes de dolomitos e níveis de arenito.

Existem notáveis variações faciológicas laterais dentro do Grupo Vazante, principalmente na comparação entre as regiões a norte e sul da Inflexão do Rio Escuro.

Para a região de Paracatu, os geólogos da Termerid Mineração definiram uma estratigrafia informal para o Grupo Vazante, da base para o topo, nos membros Retiro, Mocambo e Santa Rita (Oliveira, 1998). Esse autor ainda tentou fazer uma correlação entre as colunas litoestratigráficas e subdivisões propostas para as regiões de Paracatu (A) e Vazante (B).

		(A) Paracatu	(B) Vazante			
Formação Sa. da Lapa	Formação Sa. da Lapa Formação Sa. do Velosinho	1 2	3 4 5	3 - Dolorudito 4 - Dolarenito 5 - Bioherma estromatolítico	Membro Pamplona Superior	Formação Morro do Calcário
Formação Morro do Calcário	Membro Santa Rita	3 4 5 6	6 7	6 - Dolomito cinza claro com laminação algal e lentes de dolarenito 7 - Ardósia cinza a vrde. marga, dolomito cinza a róseo com laminação algal	Membro Pamplona Médio Membro Pamplona Inferior	
	Membro Mocambo	7	8a	8a - Dolomito cinza escuro com "bird's eyes" escuro folhelho preto carbonoso com pirita	Membro Morro do Pinheiro Superior	
	Membro Retiro	8	8b	8b - Dolomito bege a rosa com laminação algal, dolarenito e brecha lamelar	Membro Morro do Pinheiro Inferior	
Formação Sa. do Garrote	Formação Sa. do Garrote	9	9	9 - Folhelho preto com lentes de arenito e ardósia	Formação Serra do Garrote	Grupo Vazante
ESTE TRABALHO	TERMERID MINERAÇÃO	OLIVEIRA (1998)		RIGOBELLO et al. (1998)	DARDENNE et al. (1998)	

Figura 2.4: Colunas litoestratigráficas e subdivisões propostas para as regiões de Paracatu (A), definidas pelo projeto da Termerid Mineração, e Vazante (B), e correlação das unidades propostas por Oliveira (1998).

Apesar das diversas tentativas, a correlação estratigráfica entre as regiões de Vazante e Paracatu ainda não é bem estabelecida.

Tendo em vista a dificuldade de correlação e tomando por base dados da literatura (e.g. Madalosso & Valle, 1978; Oliveira, 1998; Dardenne et al., 2000; Oliveira, 2013; Dias et al., 2018),

admite-se nesse trabalho que a Formação Morro do Calcário representa a principal sequência carbonática presente entre Morro Agudo e Unaí, englobando os membros Retiro, Mocambo e Santa Rita (Oliveira, 1998). Já a Formação Serra do Poço Verde é cartografada e restrita à região de Vazante (Figura 2.2).

Oliveira (2013) propõe a divisão da evolução da sequência carbonática Vazante em dois estágios ou bacias: bacia inferior, restrita ao entorno de Vazante, em ambiente de rampa carbonática com condições evaporíticas; e bacia superior, com expressão regional, desde o sul de Vazante até o sul de Unaí que recobrem toda a sucessão anterior, marcada pela plataforma carbonática com barreira, sobrepondo a bacia representada pela Formação Serra do Poço Verde.

Idades máximas de deposição do Grupo Vazante foram determinadas por U-Pb LA-ICPMS em zircões detríticos em níveis silissiclásticos da sequência (Rodrigues, 2008; Rodrigues *et al.*, 2012). Na base do pacote, as formações Santo Antônio do Bonito e Rocinha, os zircões mais novos encontrados são de  $997 \pm 29$  Ma e  $935 \pm 14$  Ma, respectivamente. Admite-se que essas duas unidades se tratam de sequências sedimentares mais novas que o Grupo Vazante, correlacionadas ao Grupo Bambuí (Misi *et al.*, 2011; Signorelli *et al.*, 2013).

Na Formação Serra do Garrote existem grandes diferenças entre as populações de zircão das amostras coletadas nas regiões norte, nos entornos de Unaí, daquelas da região sul. Na região de Unaí, as amostras possuem padrões muito similares, com idades de zircões variando de 1.5 a 2.5 Ga e picos em 2.08 Ga. Já na região sul, ocorre uma maior variação das idades, entre 1.2 a 3.4 Ga e maiores picos em 2.13 Ga. Nas Formações Morro do Calcário e Serra da Lapa, os zircões mais jovens observados foram de 1.1 Ga, e maior pico em 1.2 Ga.

#### 2.2.4 – Região de Morro Agudo

Na Região de Morro Agudo afloram, da base para o topo, e normalmente de leste para oeste, as formações Serra do Garrote, Morro do Calcário e Serra da Lapa, do Grupo Vazante, além da Formação Serra do Landim e do Grupo Canastra (Figura 2.5).

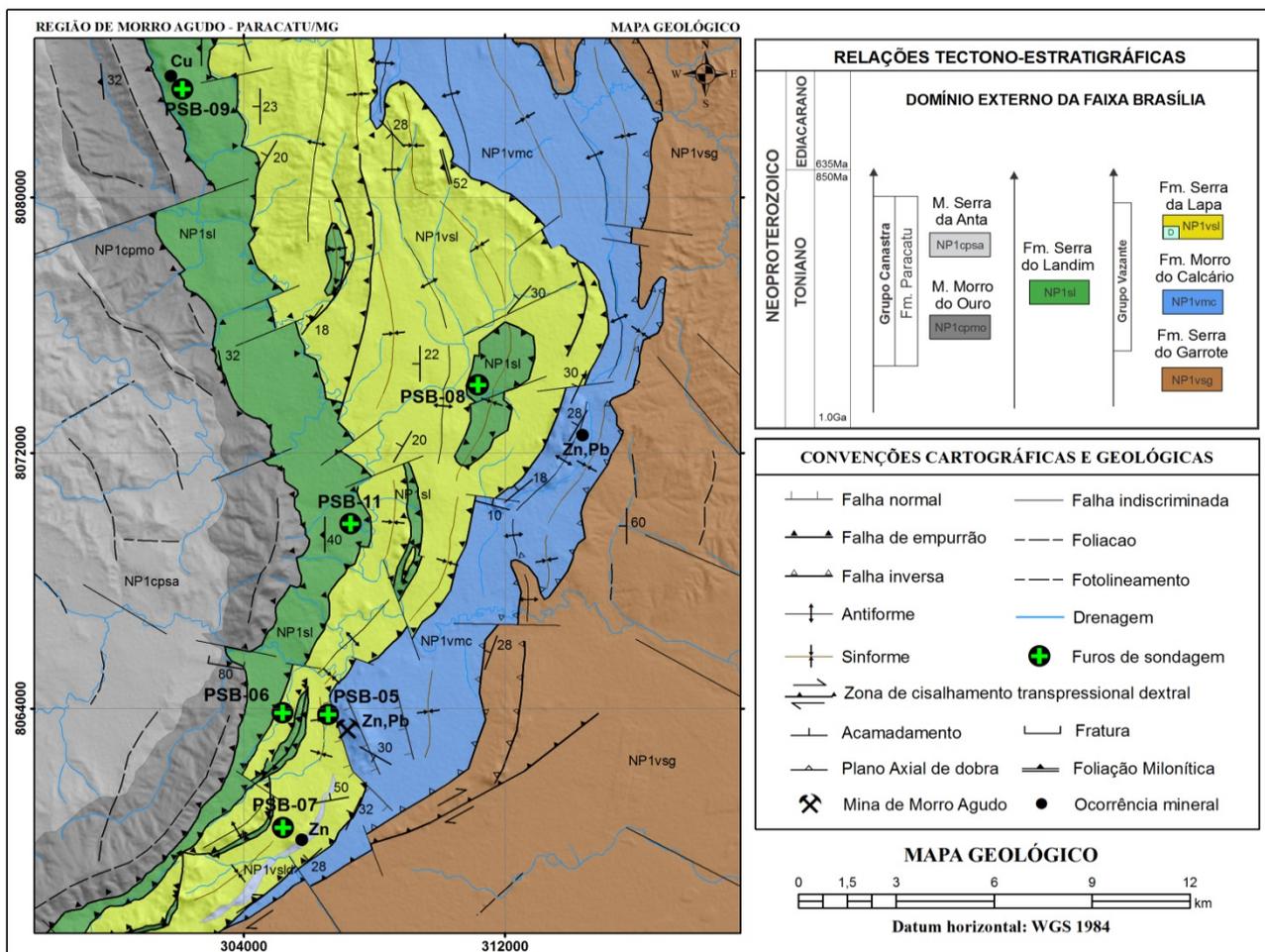


Figura 2.5: Mapa geológico da região de Morro Agudo, Paracatu-MG (modificado de Dias *et al.*, 2018).

As unidades estão estruturadas em faixas alongadas com direções preferencialmente NNE-SSW, com mergulho para NW. Na região sul da área, próxima a Mina de Morro Agudo, destaca-se uma zona de cisalhamento transpressional dextral de direção SW-NE, observada em campo (Figura 2.6a) e em testemunho (Figura 2.6b), marcada por intensa venulação de quartzo, com veios dobrados, rompidos e *boudinados*, e cataclásito.

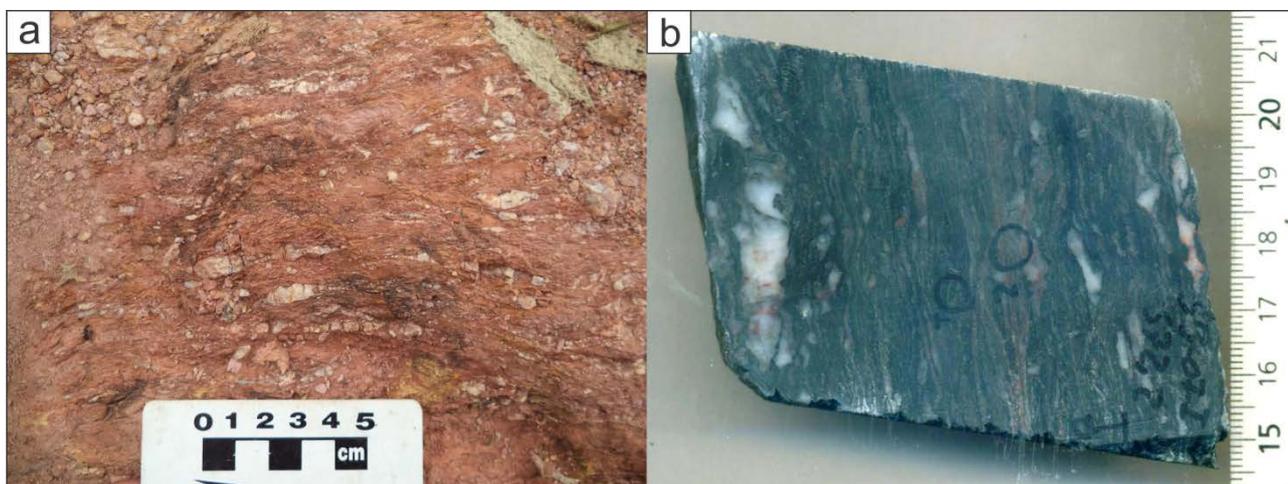


Figura 2.6: Zona de cisalhamento transpressional dextral. a – afloramento de pelito muito intemperizado com venulações rompidas e *boudinadas*; b – testemunho de sondagem de pelito esverdeado venulado.

Essa zona de cisalhamento é caracterizada por uma série de lineamentos destrais (NE-SW) que mergulham aproximadamente 40° para oeste, e é chamada de Zona de Cisalhamento de Morro Agudo (Matos, 2016).

Os contatos entre as unidades que compõem o Grupo Vazante se dão em sua maioria por falhas de empurrão de baixo ângulo ou inversas de ângulo médio a alto (Figura 2.7).

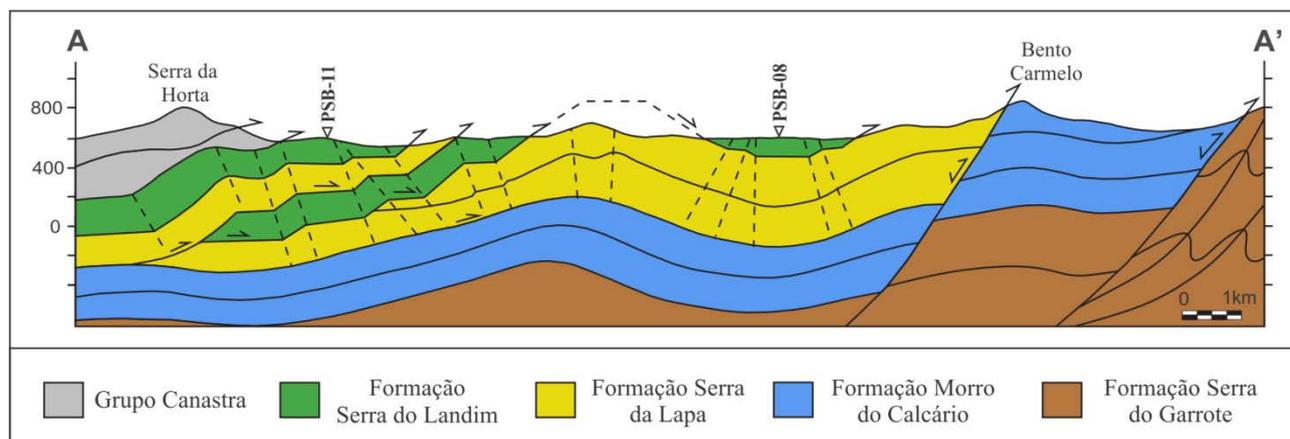


Figura 2.7: Perfil geológico esquemático da Região de Morro Agudo.

A Formação Serra do Garrote aflora na porção leste da área (Figura 2.5). É composta por um pacote relativamente homogêneo de pelito negro, carbonoso, finamente laminado e com intercalação de lamina e camadas de ritmito silto-arenoso, também carbonoso, e de esparsas lentes de arenito fino a médio. Em afloramento essas rochas frequentemente apresentam coloração em tons arroxeados ou róseos a esbranquiçados (intemperizadas). A estimativa da espessura dessa unidade é dificultada pela intensa deformação, sendo que na região da Serra da Pindaíba, a norte da área estudada, o furo PSB-10 intercepta 936,5 m dessa unidade, sem atravessá-la. É comum a presença de dobras fechadas a apertadas, tipo *chevron* e dobras desarmônicas, com vergência para leste, e flancos rompidos por falhas inversas (Figura 2.7). Em direção a leste, a medida que se distancia do contato com a Formação Morro do Calcário, a deformação diminui e as dobras apertadas gradam para abertas a suaves, gerando sinformes e antiformes regionais.

Aflorando a oeste da Formação Serra do Garrote e sotoposta estratigraficamente, ocorre a Formação Morro do Calcário. O contato entre as duas unidades se dá por falha reversa de médio a alto ângulo (Figura 2.7). Sua maior espessura observada foi superior de 870 m na região da mina de Morro Agudo (PSB-05). É composta por uma espessa seqüência dolomítica (dolomito laminado, dolarenito intraclástico, dolorrudito e brecha intraclástica) com intercalações de camadas e estratos de pelito carbonático com fácies diamictito. É a principal unidade hospedeira de mineralizações sulfetadas de Zn e Pb na região.

A Formação Morro do Calcário aflora em faixas de espessura variável, alongadas na direção NNW-SSE, estruturadas por sinformes suaves a abertos e falhas normais. Essa faixa afina em direção a sul até o seu desaparecimento em superfície (Figura 2.5).

A Formação Serra da Lapa também aflora em forma de faixa com direção preferencial NE-SW, afinando em direção a sul e abrindo para norte (Figura 2.5). A maior espessura dessa unidade, superior a 640 m, foi observada no furo PSB-09, na região da Serra do Landim. O contato com a Formação Morro do Calcário é identificado como erosivo tectonizado, porém muitas vezes é visto apenas como tectônico por falha de empurrão, e por vezes com falha normal associada (*e.g.* região de Bento Carmelo – Figura 2.7). Essa formação é composta por pacote contendo pelito carbonático carbonoso, diamictito, dolomito laminado, dolarenito, ritmito silto-argiloso e arenito. É comum a ocorrência de protomilonitos exibindo porfiroclastos rotacionados em ardósias carbonáticas, pelitos piritosos e dolomitos argilosos. Existem ocorrências minerais de esfalerita (ZnS) e galena (PbS) associadas aos dolomitos e dolarenitos.

A Formação Serra do Landim compõe uma faixa estreita, que também afina para sul e abre levemente para norte (Figura 2.5). É composta por pacote homogêneo de clorita-quartzo-sericita filito carbonático, esverdeado, com raras intercalações de metagrauvaca. Tem a sua área tipo na serra de mesmo nome, aonde chega a 408 m de espessura no furo PSB-09. O contato com a Formação Serra da Lapa se dá por falhas de empurrão, chegando a formar *klippen* sinformes, como observado na região do furo PSB-08 (Figura 2.7). Essas duas unidades ainda chegam a ocorrer tectonicamente intercaladas (*e.g.* nos furos PSB-06 e PSB-11). A Formação Serra do Landim é historicamente conhecida por hospedar ocorrências minerais de malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})$ ). A Formação Serra do Landim é marcada pela estruturação em dobras com geometria em *kinks* e caixa.

A Formação Paracatu do Grupo Canastra é a unidade mais a oeste da área (Figura 2.5). O contato com a Formação Serra do Landim também ocorre por falhas de empurrão de baixo ângulo. Na região ocorrem duas subunidades: Membro Morro do Ouro (base) composto por filito carbonoso e raras lentes de quartzito; e Membro Serra da Anta (topo) composto por intercalação de quartzitos e filitos sericíticos a carbonosos. Na base, em uma zona de *boudins* de quartzo, está hospedado o depósito de ouro de Morro do Ouro, em Paracatu.

Recobrimo todas as unidades geológicas, ocorrem coberturas inconsolidadas recentes, que incluem três tipos de sedimentos: Depósitos Aluvionares que ocorrem nos leitos das drenagens e são compostos por sedimentos areno-argilosos; Coberturas Lateríticas formadas por crosta ferruginosa; e Coberturas Indiferenciadas, que são sedimentos e solo areno-argilosos que ocorrem nas planícies.

### 3. ANÁLISE DE FÁCIES E AMBIENTES DEPOSICIONAIS

Este capítulo é destinado à apresentação e discussão dos dados do empilhamento estratigráfico, análise de fácies sedimentares e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região de Morro Agudo. O capítulo está estruturado em forma de artigo, intitulado “*Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da Mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais*”.

#### Resumo

Rochas do Grupo Vazante afloram no noroeste do estado de Minas Gerais, em uma faixa contínua de aproximadamente 250 km, da região de Vazante, a sul, até Unaí, a norte. Nessa região está localizada a mina de zinco e chumbo de Morro Agudo, que juntamente com os depósitos de Vazante, Ambrósia e Fagundes, todos hospedados no Grupo Vazante, compõem a principal província zincífera do país. Foram descritas em seis testemunhos de sondagem e afloramentos de campo na região, doze fácies sedimentares e quatro associações de fácies (*AFs*), que indicam deposição em ambiente de margem passiva mista carbonática-siliciclástica. A associação mais basal (*AF01*) é composta por pelitos e ritmitos silto-arenosos carbonosos, representando sedimentação em plataforma profunda de baixa declividade, em regime de transgressão marinha. Após a inundação máxima, em trato de mar alto, depositou-se a *AF02* em ambiente de recife com barreiras em borda de plataforma, composta por dolomitos laminados com estromatólitos, dolarenitos e brechas dolareníticas, e ainda pelitos carbonáticos carbonosos com fácies diamictito. O abaixamento do nível relativo do mar gerou uma regressão forçada e a deposição da *AF03* em trato de sistema do estágio de queda. É composta, na base, por diamictito argilo-carbonoso com fragmentos de *AF02*, passando a pelito e ritmito silto-arenoso. A retomada da subida do nível relativo do mar proporcionou a deposição da *AF04* e ainda de rochas da *AF03* em posição mais distal. A *AF04* é composta por dololutitos argilosos laminados e maciços, e dolarenitos intraclásticos depositados em plataforma carbonática. O padrão de empilhamento observado sugere que a deposição de todas as unidades ocorreu progressivamente, em processo de subida do nível relativo do mar (tratos transgressivos e mar alto), de queda e da retomada da subida (mar baixo).

**Palavras-chave:** Grupo Vazante; Fácies sedimentares; Plataforma mista.

#### Abstract

Vazante Group rocks outcrop in the northwest of Minas Gerais state, in a continuous belt of approximately 250 km, from the region of Vazante city, in the south, to Unaí city, in the north. In this region is located the zinc and lead mine of Morro Agudo, which together with the deposits of Vazante, Ambrósia and Fagundes, all housed in the Vazante Group, make up the main zinc province of the country. Were described in six drill holes and outcrops, twelve sedimentary facies and four facies associations (*AFs*), indicate deposition in a carbonate-siliciclastic mixed passive margin setting. The most basal association is *AF01*, composed by carbonaceous mudstone and silt-sand rhythmic, representing sedimentation in a deep platform of low slope angle, in a regime of marine transgression. After the maximum flood surface, in the highstand systems tract, the *AF02* was deposited in a reef setting with a barrier at the platform edge. It is

composed of laminated dolomites with stromatolites, dolarenites and dolarenite breccia, and carbonate carbonaceous mudstones with interleaved diamictite facies. The fall in relative sea level led to a forced regression and the deposition of the **AF03** in a forced regressive systems tract. It is composed, at the base, by carbonaceous diamictite with fragments of **AF02**, passing to mudstone and silt-sand rhythmites. The return of the rise of the relative sea level provided the deposition of **AF04** and **AF03** rocks in a more distal position. The **AF04** is composed by laminated and massive argillaceous dololomite, and intraclastic dolarenite, deposited in carbonate marine platform. The observed stacking pattern suggests that the deposition of all units occurred progressively, in process of rising relative sea level (transgressive and highstand systems tracts), of falling sea level (forced regressive systems tract), and return of rising relative sea level (lowstand normal regression).

**Keywords:** Vazante Group; Sedimentary facies; Mixed platform.

### 3.1 – Introdução

A região de Morro Agudo está situada a sul da cidade de Paracatu, noroeste de Minas Gerais. Nessa região está localizada a mina de zinco e chumbo de Morro Agudo, que juntamente com os depósitos de Vazante, Ambrósia e Fagundes, todos hospedados no Grupo Vazante (Dardenne et al., 1998; Dardenne, 2000), compõem a principal província zincífera do país. Tratam-se de mineralizações hidrotermais de zinco hospedadas em rochas carbonáticas (Dardenne, 1972, 1978; Romagna e Costa, 1988; Monteiro, 1997, 2002).

Existem notáveis diferenças entre os tipos de mineralização das regiões de Vazante e de Paracatu. A mineralização de Vazante é silicatada, possui forte controle estrutural, é hospedada em brecha hidrotermal, relacionada ao preenchimento por fluidos da Falha de Vazante, e o principal mineral-minério é a willemita ( $Zn_2SiO_4$ ) (Rigobello et al., 1988; Dardenne, 1998; Pinho, 1989; Monteiro, 1997, 2002). Já o minério de Morro Agudo é sulfetado, composto principalmente por esfalerita (ZnS) e galena (PbS) compondo corpos estratiformes, associadas a dolarenitos e brechas dolomíticas a dolareníticas, principalmente das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa (Dardenne, 1972; Madalosso e Valle, 1978; Romagna e Costa, 1988; Dardenne e Schobbenhaus, 2001; Neves, 2011). Nesse segundo tipo de mineralização, a estratigrafia local é um fator determinante para a ocorrência dos depósitos.

No presente artigo, será descrito o empilhamento estratigráfico do Grupo Vazante na região de Morro Agudo, bem como as fácies sedimentares, associações de fácies e os processos sedimentares associados, baseados em dados de campo e de testemunhos de furos de sondagem obtidos na região. A partir destes dados, será discutido o ambiente deposicional e a correlação das fácies.

## 3.2 – Contexto geológico

### 3.2.1 – Geologia regional

A região estudada encontra-se inserida na porção centro-sul da Faixa Brasília, que é classicamente definida como um orógeno colisional neoproterozoico localizado na borda oeste do Cráton do São Francisco (Figura 3.1A) (Almeida, 1967, 1968, 1977; Dardenne, 2000; Valeriano et al., 2004). Faz parte do Domínio Tectônico da Zona Externa da Faixa Brasília e do Cinturão de Dobras e Empurrões, e é caracterizada por cinturão de dobras e cavalgamentos com vergência para leste (Fuck, 1994; Fuck et al., 2005). Nesse contexto, pertence à porção mais externa do orógeno, na borda oeste do cráton, e é composta por unidades metassedimentares dobradas e metamorizadas em baixo grau, pertencentes aos grupos Vazante, Canastra e Paranoá (Figura 3.1B) (Dardenne, 2000).

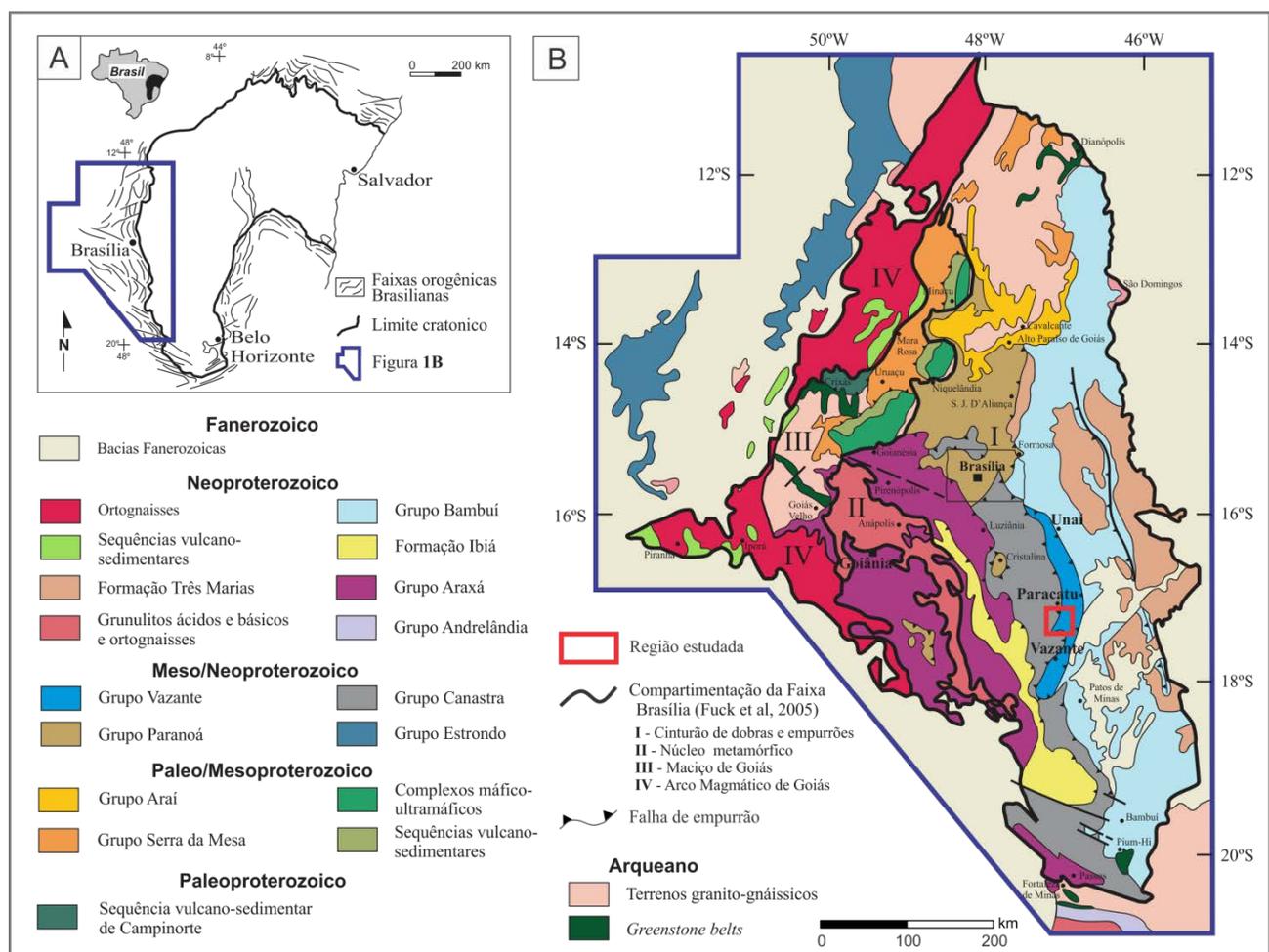


Figura 3.1: Mapa Tectônico e localização da área. A – Localização da Faixa Brasília no contexto do cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim e Teixeira, 2017); B – Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck et al. 2005.

A faixa de ocorrência do Grupo Vazante, denominada Faixa Vazante (Dardenne et al., 1998; Dardenne, 2000), estende-se por cerca de 250 km na direção N-S, com largura variando de 25 a 30 km, e pode ser dividida em dois domínios, norte e sul, separados pela inflexão do Rio Escuro. Essa

inflexão também faz a separação entre os domínios de ocorrência de mineralizações de zinco silicatado (sul) e sulfetado (norte), e ainda das rochas hospedeiras.

As rochas que compõem o hoje chamado de Grupo Vazante foram inicialmente relacionadas ao Grupo Bambuí por diversos autores (*e.g.* Dardenne, 1972; Madalosso e Valle, 1978; Brandalise et al., 1980). Dardenne et al. (1998) e Dardenne (2000) redefiniram a Formação Vazante, que passou ao patamar de Grupo, não mais correlacionado à sedimentação de antepaís do Grupo Bambuí, constituído por uma espessa sequência marinha de margem passiva, pelítico-carbonática, de aproximadamente 5 Km de espessura, dividida em cinco formações resumidas na Figura 3.2.

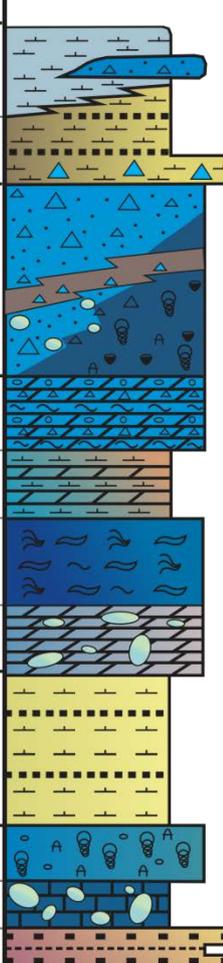
Grupo	Formação	Membro	Descrição litológica	
<b>Vazante</b>	<b>Serra da Lapa</b>	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas e lentes de dolomitos	
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas, ritmitos e diamictito	
	<b>Morro do Calcário</b>		Bioherma estromatolítica, fácies de brechas e dolarenitos, pelitos carbonáticos carbonosos com fácies de diamictito (mocambo)	
	<b>Serra do Poço Verde</b>	Pamplona Intermediário	Dolomitos rosados com esteiras estromatolíticas, nódulos de barita e gretas de ressecamento	
		Pamplona Inferior	Ardósias cinza a verde com intercalações de dolomitos rosados Depósito mineral: Vazante	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-escuros com esteiras estromatolíticas e <i>birds eyes</i>	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-claros a rosados com intercalações de brechas e dolarenitos	
	<b>Serra do Garrote</b>		Ardósias cinzas com lentes de quartzitos esporádicas	
	<b>Lagamar</b>	Sumidouro	Bioherma estromatolítica	
			Calcários cinza-escuros e brechas dolomíticas	
Arrependido		Conglomerados		

Figura 3.2: Coluna estratigráfica do Grupo Vazante (modificado de Dardenne, 2000).

A coluna estratigráfica proposta por Dardenne (2000) (Figura 2) foi formalmente definida na região da cidade de Vazante-MG. Nesse local existem vários trabalhos que balizam o entendimento da estratigrafia e das mineralizações associadas (*e.g.* Dardenne, 1998, 2000, 2001; Monteiro, 1997, 2002; Oliveira, 2013; Baia, 2013). Dardenne (2000) ainda admite duas unidades na base do grupo: formações Santo Antônio do Bonito (porção mais inferior) e Rocinha. Porém trabalhos mais recentes indicam que houve inversão tectônica na região, posicionando essas unidades mais novas abaixo de outras mais antigas (*e.g.* Formação Serra do Garrote), e correlacionam essas duas

formações ao Grupo Bambuí (Rodrigues et al., 2012; Pinho et al., 2014; Misi et al., 2007, 2014; Marques et al., 2015).

Para região de Paracatu o empilhamento estratigráfico não é bem estabelecido, representado em uma coluna informal definida pelos geólogos da Mineração Termerid (Oliveira, 1998), e a correlação com a região de Vazante ainda é alvo de grande discussão.

### 3.2.2 – Estratigrafia local da região de Morro Agudo

Na Região de Morro Agudo (Figura 3.3) afloram, da base para o topo, e normalmente de leste para oeste, as formações Serra do Garrote, Morro do Calcário e Serra da Lapa, do Grupo Vazante. Além dessas, ainda ocorrem na área a Formação Serra do Landim e o Grupo Canastra, as quais não são objeto desse estudo.

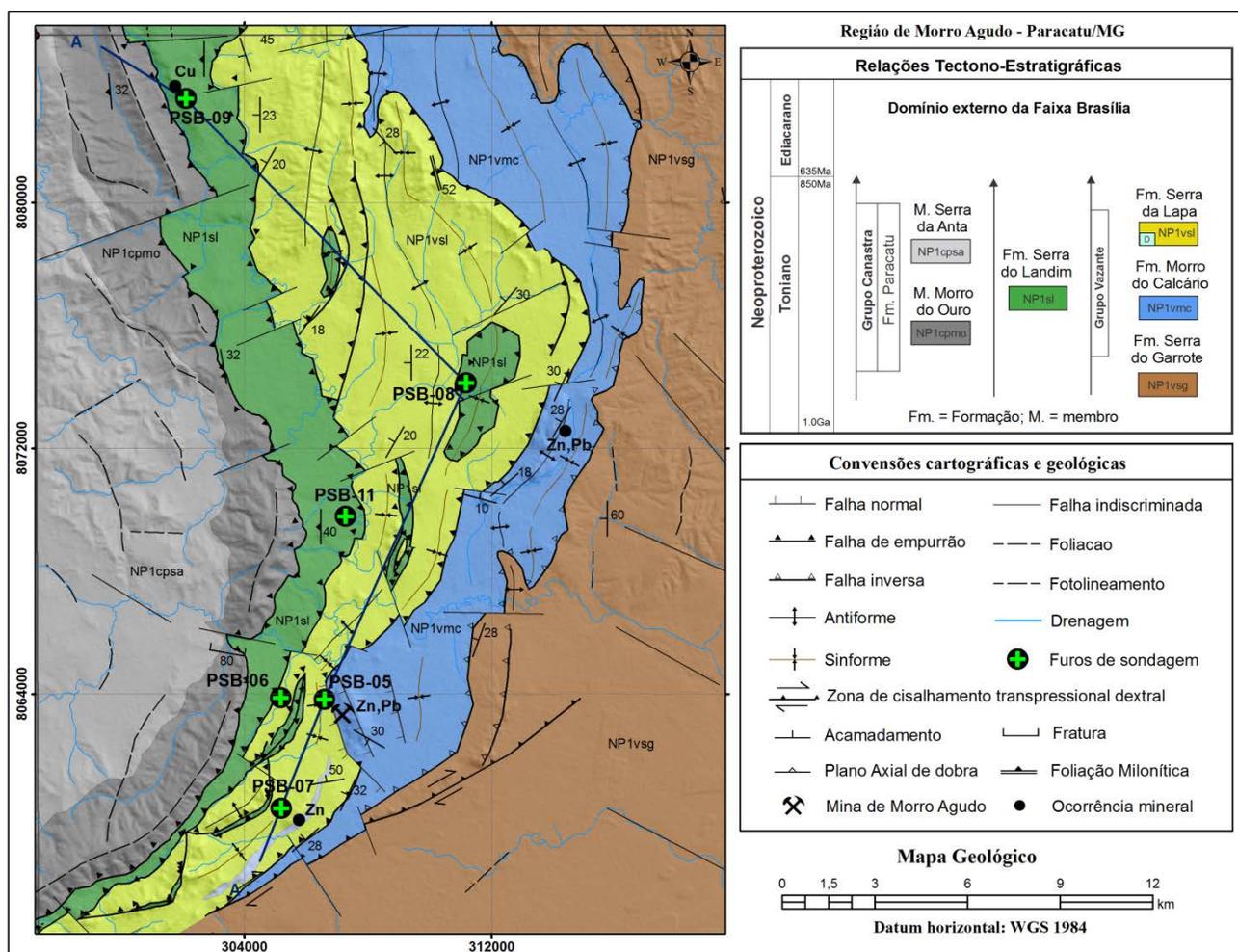


Figura 3.3: Mapa geológico da região de Morro Agudo, Paracatu-MG (modificado de Dias et al., 2018).

As unidades estão estruturadas em faixas alongadas com direções preferencialmente NNE-SSW, com mergulho para NW (Figura 3.3). Os contatos se dão na sua maioria por falhas de empurrão de baixo ângulo ou inversas de ângulo médio a alto.

A Formação Serra do Garrote aflora na porção mais a leste da área. É composta por um pacote relativamente homogêneo de pelito preto, carbonoso, finamente laminado e com intercalação

de laminae e camadas de ritmito silto-arenoso, também carbonoso, e de esparsas lentes de arenito fino a médio. Em afloramento essas rochas frequentemente apresentam coloração em tons arroxeados ou róseos a esbranquiçados. A estimativa da espessura dessa unidade é dificultada pela intensa deformação observada, sendo que na região da Serra da Pindaíba, a norte da área estudada, o furo PSB-10 intercepta 936,5 m dessa unidade, sem cortar a unidade em sua totalidade.

Aflorando a oeste da Formação Serra do Garrote e sotoposta estratigraficamente, ocorre a Formação Morro do Calcário. O contato entre as duas unidades se dá por falha reversa de médio a alto ângulo. Essa unidade compõe uma faixa com grandes variações de espessura, afinando em direção a sul até o seu desaparecimento em superfície. Sua maior espessura observada é de superior a 870 m na região da mina de Morro Agudo (PSB-05). É composta por uma espessa sequência dolomítica (dolomito laminado, dolarenito intraclástico, dolorrudito e brecha intraclástica) com intercalações de camadas e estratos de pelito carbonático com fácies diamictito. Representa a principal unidade hospedeira de mineralizações de Zn e Pb na região.

A Formação Serra da Lapa aflora em forma de faixa com direção preferencial NE-SW, afinando em direção a sul e abrindo para norte. A maior espessura dessa unidade, superior a 640 m, foi observada no furo PSB-09, na região da Serra do Landim. O contato com a Formação Morro do Calcário é identificado como erosivo, porém muitas vezes é visto apenas como tectônico por falha de empurrão, com falha normal posterior associada (*e.g.* região oeste da mina de Morro Agudo). Essa formação é composta por pacote contendo pelito carbonático carbonoso, diamictito, dolomito laminado, dolarenito, ritmito silto-argiloso e arenito. É comum a ocorrência de protomilonitos exibindo porfiroclastos rotacionados em ardósias carbonáticas, pelitos piritosos e dolomitos argilosos. Existem ocorrências minerais de esfalerita e galena associadas aos dolomitos e dolarenitos.

A Formação Serra do Landim aflora em faixa estreita, que também afina para sul e abre levemente para norte. É composta por pacote homogêneo de clorita-quartzo-sericita filito carbonático, esverdeado, com raras intercalações de metagrauvaca. Tem a sua área tipo na serra de mesmo nome, aonde chega a 408 m de espessura (PSB-09). O contato com a Formação Serra da Lapa se dá por falhas de empurrão, chegando a formar *klippen* sinformes, como observado na região do furo PSB-08 (Figura 3.3). Essas duas unidades ainda chegam a ocorrer tectonicamente intercaladas (*e.g.* nos furos PSB-06 e PSB-11). A Formação Serra do Landim é historicamente conhecida por hospedar ocorrências minerais de malaquita.

A Formação Paracatu do Grupo Canastra é a unidade mais a oeste da área. O contato com a Formação Serra do Landim também ocorre por falhas de empurrão de baixo ângulo. Na região ocorrem duas subunidades: Membro Morro do Ouro (base) composto por filito carbonoso e raras lentes de quartzito; e Membro Serra da Anta (topo) composto por intercalação de quartzitos e filitos

sericíticos a carbonosos. Na base dessa unidade, em uma zona de *boudins* de quartzo, está hospedado o depósito de Au de Morro do Ouro a norte da área, em Paracatu.

### 3.3 – Materiais e métodos

Os testemunhos e os dados de sondagem utilizados nesse trabalho foram obtidos pelo Projeto de Sondagem Bambuí (PSB) – DNPM/CPRM realizado nas décadas de 1970 e 1980 (Brandalise et al., 1980), quando foram realizados furos de sondagem estratigráfica com o objetivo de obter informações geológicas em subsuperfície sobre as ocorrências de zinco da região.

Foram reanalisados testemunhos de seis furos presentes na área (PSB-05, PSB-06, PSB-07, PSB-08, PSB-09 e PSB-11), totalizando 5.911,9 metros (Figura 3.1).

Tabela 3.1: Localizações geográficas e profundidades dos furos de sondagem utilizados nesse trabalho. As coordenadas UTM possuem Datum SAD-69, na zona 23S.

Furo	UTM-E	UTM-N	Profundidade (m)	Toponímia	Município/UF
<b>PSB-05</b>	306575,0	8063808,0	1050,0	Mina de Morro Agudo	Paracatu/MG
<b>PSB-06</b>	305168,0	8063859,0	950,0	Oeste da Mina de Morro Agudo	Paracatu/MG
<b>PSB-07</b>	305182,0	8060269,0	900,0	Morro do Capão	Paracatu/MG
<b>PSB-08</b>	311164,0	8074116,0	953,2	Bento Carmelo	Paracatu/MG
<b>PSB-09</b>	302096,0	8083371,0	1056,2	Serra do Landim	Paracatu/MG
<b>PSB-11</b>	307259,0	8069772,0	1002,5	Carrapato	Paracatu/MG

A localização de cada furo pode ser visualizada na Figura 3. Foram coletadas 291 amostras de rocha nos testemunhos. Ainda foram realizados levantamentos geológicos de 130 localidades de campo e coletadas 90 amostras dentro da área estudada.

Os litotipos observados foram descritos como rochas sedimentares apesar da deformação sobreposta, que muitas vezes dificulta a observação das estruturas primárias.

A análise de fácies foi embasada pelas definições e sistemáticas de Reading (1986), Walker e James (1992) e Miall (1996). A individualização das fácies foi realizada através da descrição das litofácies, estruturas sedimentares e geometria. Foram agrupadas fácies geneticamente correlacionadas em Associações de Fácies e por fim, proposto um modelo deposicional e os paleoambientes. O código de cada fácies é composto por uma letra maiúscula indicando o litotipo principal, e duas minúsculas, indicando características particulares relevantes.

### 3.4 – Resultados e discussões

No presente trabalho sobre o Grupo Vazante, na região estudada, foram individualizadas e descritas fácies sedimentares agrupadas em associações de fácies. As rochas metassedimentares do Grupo Canastra e da Formação Serra do Landim que também afloram na região não foram objeto desse trabalho.

A Tabela 3.2 sintetiza os resultados das descrições das fácies e de suas implicações em processos e ambientes sedimentares. As *AFs* estão organizadas em ordem de ocorrência na região, da base para o topo, *AF01*, *AF02*, *AF03* e *AF04*.

Tabela 3.2: Tabela-resumo da análise de fácies na região de Morro Agudo.

<i>AF</i>	<i>Fácies</i>	<b>Litologia</b>	<b>Estrutura/textura sedimentar</b>	<b>Processos e interpretação</b>
<i>AF04</i>	<i>Dic</i>	Dolomito maciço e dolarenito intraclástico	Maciço, mal selecionado.	Processos de tração e decantação. Variação de energia no sistema.
	<i>DIm</i>	Dololuto impuro laminado/macioso	Laminação plano-paralela; porções maciças; recristalização.	Deposição por processo de decantação, ora com alternância de energia, ora contínuo.
<i>AF03</i>	<i>Rpa</i>	Ritmito pelito carbonático e arenito	Laminação plano-paralela, as vezes onduladas. Estratificação cruzada tabular.	Alternância de processos de decantação e tração. Marinho com correntes de turbidez.
	<i>Dap</i>	Dolomito argiloso e pelito carbonático	Laminação plano paralela.	Deposição por decantação em ambiente marinho profundo a moderado.
	<i>Dia</i>	Diamictito com matriz argilo carbonosa e fragmentos de dolomito.	Blocos muito mal selecionados desordenados em matriz fina. Fragmentos da <i>AF02</i> .	Deposição por fluxo de detritos em ambiente marinho profundo a moderado.
<i>AF02</i>	<i>Bim</i>	Brecha intraclástica.	Maciça. Fragmentos moderadamente selecionados argulosos a arredondados.	Fluxo de detritos e retrabalhamento de fragmentos de dolarenitos, dololutos e dolomito laminado e estromatolítico.
	<i>Dim</i>	Dolarenito intraclástico.	Rocha maciça, bem selecionada, com pouca ou nenhuma matriz. Intensa cimentação.	Retrabalhamento por processos de tração de rochas carbonáticas associadas ao recife.
	<i>Pcc</i>	Pelito carbonático carbonoso com matéria orgânica.	Laminação plano paralela.	Deposição por decantação em ambiente profundo, calmo.
	<i>Ded</i>	Diamictito com matriz argilo carbonática e fragmentos dolomíticos.	Matriz fina. Fragmentos mal selecionado. Tendência de diminuição dos fragmentos em direção ao topo.	Fluxo de detritos e retrabalhamento de fragmentos de dolarenitos, dololutos e dolomito laminado e estromatolítico.
	<i>Dle</i>	Dolomito laminado com estromatólitos colunares.	Bio-laminações e colunas estromatolíticas. Falhas sim-sedimentares.	Ambiente recifal com intensa atividade biológica.
<i>AF01</i>	<i>Plc</i>	Pelito preto laminado e carbonoso.	Laminação plano paralela.	Deposição por decantação em ambiente marinho profundo.
	<i>Rsa</i>	Ritmito silto-arenoso com matéria orgânica.	Laminação plano paralela, as vezes ondulada.	Alternância de processos de decantação e tração. Marinho profundo afetado por correntes de turbidez.

### 3.4.1 – Fácies sedimentares

#### 3.4.1.1 – Pelito laminado carbonoso (*Plc*)

A fácies pelito laminado carbonoso (*Plc*) é constituída por pelitos pretos, finamente laminados, e piritosos (Figura 3.4A e 3.4B). Ocorre abundância de matéria carbonosa, que dá a cor preta à rocha fresca. Em afloramento, quase nunca são observadas as características carbonosas devido ao elevado grau de intemperismo, conferindo coloração rósea, esbranquiçada e avermelhada (Figura 3.4A). Ocorrem raras intercalações subordinadas de siltito rico em sericita e quartzo, também com abundância de matéria orgânica. Essa fácies compõe desde lâminas, camadas e estratos variando de espessuras centimétricas até de muitos metros.

A estruturação sedimentar observada é de laminações plano-paralelas. As laminações estão muitas vezes tectonicamente dobradas e falhadas, o que dificulta a identificação das feições sedimentares.

Essa fácies representa deposição por decantação em ambiente aquoso de baixa energia, com profundidade moderada a alta, muito redutor e com abundância de matéria orgânica.

#### 3.4.1.2 – Ritmito silto-arenoso (Rsa)

A fácies Ritmito silto-arenoso (*Rsa*) é constituído por intercalações rítmicas quartzo-sericítica de siltito e arenito muito fino, também com relevante contribuição carbonosa (Figura 3.4C e 3.4D). Laminações plano-paralelas escuras e claras marcam o acamamento sedimentar, muitas vezes com ondulações primárias. Alternam-se lâminas milimétricas com material mais fino e escuro, compostas por argila e silte, de outras mais claras com maiores concentração de silte e areia fina (Figura 3.4D).

Na região do Morro do Capão essa fácies encontra-se intensamente deformada e venulada. A rocha é composta por grãos com tamanhos que variam de silte a areia fina de quartzo, plagioclásio e paletas de moscovita em matriz sericítica, muitas vezes com filmes de matéria carbonosa. Os grãos de quartzo são subangulosos a subarredondados. O acamamento é marcado pela variação da granulometria dos grãos e pela proporção grão/matriz.

Apesar do predomínio de ritmito, aflora a norte da área, associada a essa fácies, lentes de grauvaca mal selecionada, com grãos de quartzo e raro feldspato, variando de fino a grânulo, com matriz argilosa, a oeste do Morro de Bento Carmelo (Madalosso e Valle, 1978).

Esta fácies teria se originado por alternância entre processos de decantação e tração, o que indicaria alternância na energia do ambiente.

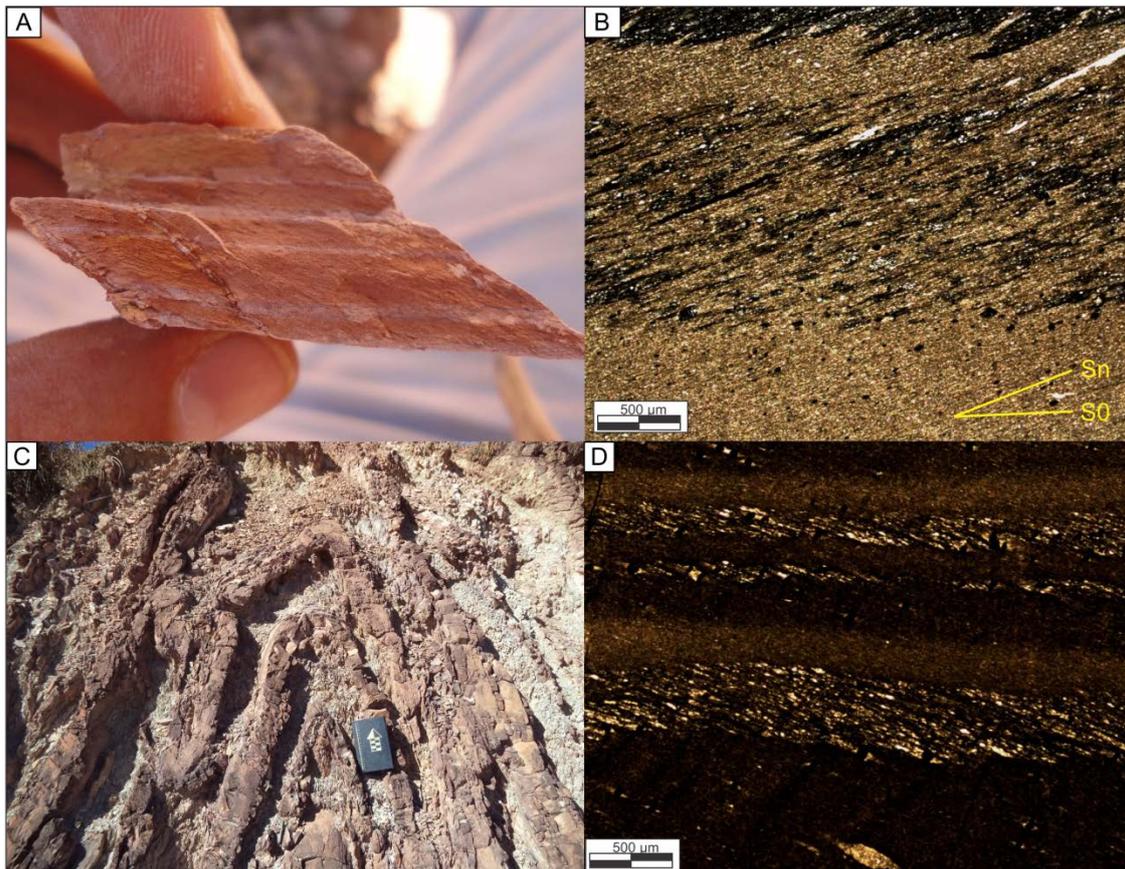


Figura 3.4: Fotos das fácies *Plc* e *Rsa*. A – Pelito laminado (*Plc*) com finas lâminas de siltito (amostra intemperizada); B – Fotomicrografia de pelito laminado com variação na proporção de matéria carbonosa; C – Afloramento de ritmo silto-arenoso dobrado pertencente à fácies *Rsa* (afloramento a norte da área estudada, porém na mesma unidade); D – Fotomicrografia de ritmo com lâminas pelíticas e outras com areia muito fina.

#### 3.4.1.3 – Dolomito laminado estromatolítico (*Dle*)

A fácies dolomito laminado estromatolítico (*Dle*) é composta por dolomito laminado (dolossiltito/dololutito), com bio-laminações irregulares, intercalado com estromatólitos colunares e estratos de dolomito maciço (Figura 3.5A). Em escala microscópica, as laminações estromatolíticas são compostas por micrita, às vezes mais claras, outras mais escuras. Dolomita esparítica ocorre cimentando a rocha de forma dispersa, muitas vezes preenchendo fraturas. Chega a ter espessura superior a 200 m em Morro Agudo.

A observação das características sedimentares da rocha é dificultada pela intensa recristalização e silicificação. É comum a presença de estilólitos sub-horizontais preenchidos por material escuro amorfo e fraturas preenchidas por dolomita esparítica.

Em campo, essa fácies é descontínua lateralmente. Interpreta-se que falhamentos de direção N-S e E-W encontravam-se ativos durante a sedimentação, com rebaixamento e elevação de blocos, o que teria ocasionado truncamento lateral das fácies, rebaixando e elevando blocos da bacia. Isso faz com que ocorram truncamentos laterais de fácies diferentes.

Essa fácies comumente ocorre associada à níveis subordinados de dolarenito e brecha dolomítica e dolarenítica.

Representa a deposição por precipitação química e biológica, em ambiente calmo e com intensa atividade biológica, possivelmente compondo um recife. Essa fácies mostra que o ambiente passou por períodos de instabilidade do substrato, com presença de falhas normais sin-sedimentares e mudança na direção de crescimentos de colunas estromatolíticas.

#### 3.4.1.4 – Pelito carbonático carbonoso (*Pcc*)

A fácies pelito carbonático carbonoso (*Pcc*) é composta por rocha escura, muito fina, com acamamento sedimentar marcado pela proporção de matéria orgânica, alternando lâminas cinza pouco mais claro e mais escuro. A matriz da rocha é composta por sericita, dolomita microcristalina e matéria carbonosa. Ocorrem grãos tamanhos silte a areia muito fina de quartzo e fragmentos de carbonato. Muitos grãos de quartzo e quase todos os de carbonato estão estirados e alinhados com a foliação da rocha.

Representa deposição em ambiente de baixa energia, com predomínio de processo de decantação. A deposição dessa fácies ocorreu em ambiente profundo, calmo, com suprimento de carbonato intrabacinal.

#### 3.4.1.5 – Diamictito carbonoso com clastos dolomíticos (*Dcd*)

A fácies diamictito carbonoso com clastos de dolomito estromatolítico (*Dcd*) é composta por diamictito com matriz argilo-carbonática e fragmentos de rochas dolomíticas, frequentemente com colunas de estromatólitos (Figura 3.5B). A matriz da rocha é composta por pelito cinza escuro e com relevante contribuição carbonosa. Os fragmentos variam desde frações grânulo até seixos. Todos os fragmentos identificados são de rochas dolomíticas, muitas vezes recristalizadas e silicificadas. Ocorrem alguns fragmentos mais preservados de dolomito e dolomito laminado estromatolítico (*Dle*). Aparenta haver tendência de diminuição dos tamanhos dos fragmentos em direção ao topo. Essa fácies, associada a *Pcc*, possui espessuras que variam de 55 a 140 m.

Representa deposição por fluxo de detritos ou queda de blocos gerada por avalanches episódicas. O carbonato na matriz e os fragmentos de dolomito estromatolítico indicam proximidade com o recife, em ambiente calmo na maior parte do tempo, porém com frequente instabilidade.

#### 3.4.1.6 – Dolarenito intraclástico maciço (*Dim*)

A fácies dolarenito intraclástico maciço (*Dim*) é constituída por dolarenito cinza suportado por grãos carbonáticos arredondados tamanho areia, raramente alongados, arrançados em empacotamento que varia de frouxo a apertado (Figura 3.5C). A maioria são intraclastos compostos por dolomita com cristalinidade muito fina, porém também são identificados dolarenito oolítico, oólitos, dolarenito e dolomito laminado (Figura 3.5D). Em alguns locais o tamanho dos intraclastos

chegam a areia muito grossa e até grânulo (Figura 3.5E). Alguns intraclastos possuem grãos de quartzo em meio a dolomita. Ocorrem fragmentos escuros com altos teores de fósforo, possivelmente compostos de colofana. Ocorrem ainda estruturas arredondadas preenchidas por betume negro.

Na maioria das lâminas descritas ao microscópio, a rocha não possui matriz, com o espaço entre os grãos sendo preenchido por cimento de dolomita esparítica, esfalerita, pirita e rara galena. Os sulfetos ocorrem em aglomerados irregulares e preenchem os espaços entre os grãos, substituindo o cimento da rocha e também preenchendo porosidade intragranular e fraturas.

A rocha possui textura maciça, raramente com grãos alongados arranjados em uma direção preferencial, possivelmente marcando o acamamento sedimentar. É comum a presença de estilólitos subhorizontais, muitas vezes preenchidos por material escuro carbonoso ou sulfetos.

Representa o retalhamento por processos de tração de fragmentos de rochas carbonáticas relacionadas ao recife.

#### 3.4.1.7 – Brecha intraclástica maciça (Bim)

A fácies brecha intraclástica maciça (*Bim*) é composta por fragmentos de dolomito laminado, dolomito estromatolítico, dolomito maciço e dolarenito, imersos em matriz dolomítica. Os fragmentos são subarredondados a angulosos e possuem tamanhos que vão desde areia grossa a blocos. A matriz é maciça e o acamamento é raramente marcado por laminações. É comum a ocorrência de estilólitos subhorizontais preenchidos por material escuro carbonoso. A sucessão composta por *Bim* e *Dim*, possui espessuras que variam de 75 a 130 m. Foram observadas dois tipos de matriz: dolarenítica e dololulítica (Figura 3.5F).

Representa a deposição por fluxo gravitacional com transporte de seixos e blocos de rochas dolomíticas.

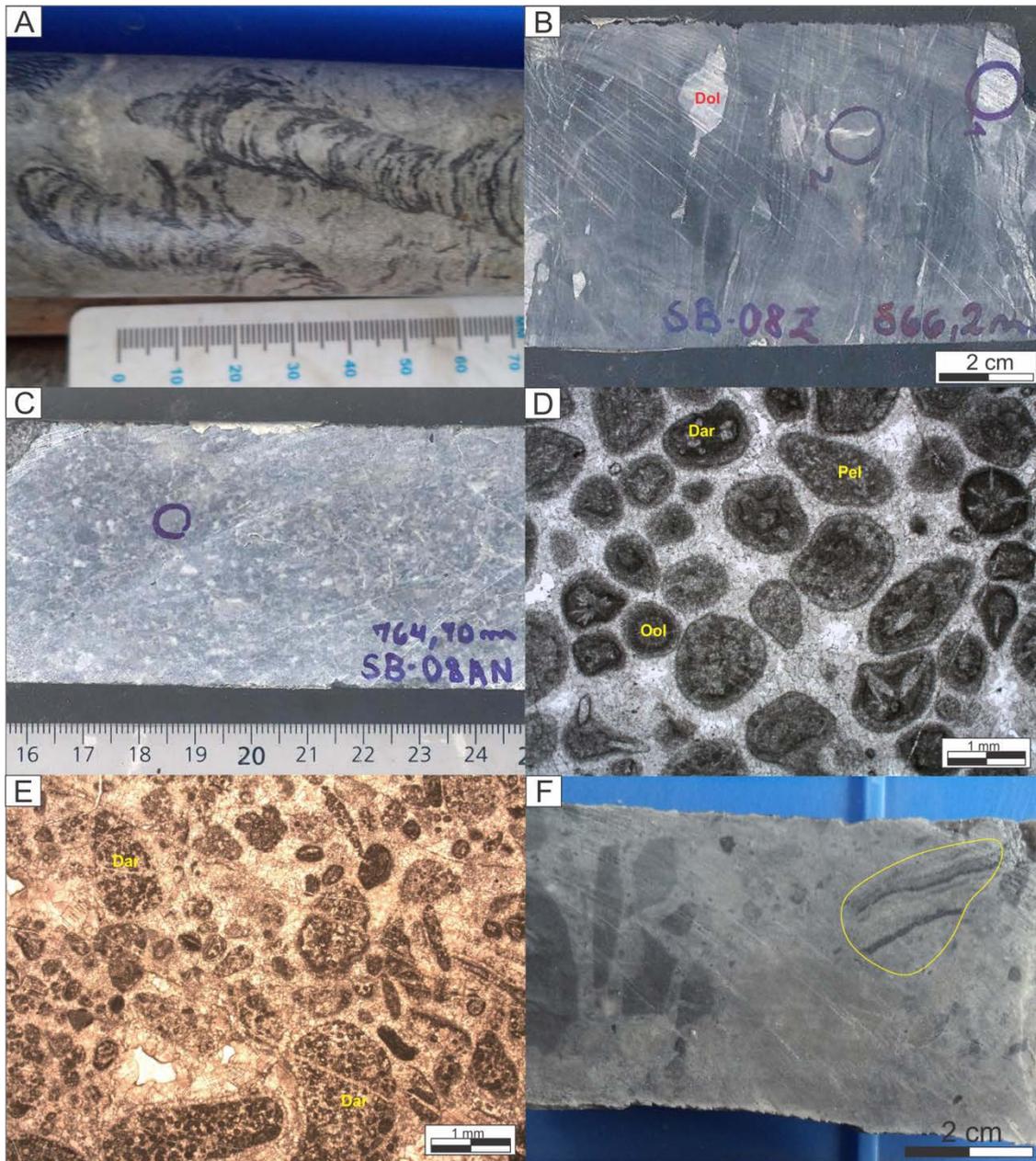


Figura 3.5: Fotos das fácies *Dle*, *Dce*, *Pcc*, *Dim* e *Bim*. A – Fácies *Dle* com construções estromatolíticas; B – Fácies *Dce* com fragmentos de dolomito em matriz; C – Dolarenito cinza grosseiro (fácies *Dim*); D – Fotomicrografia de *Dim* mostrando os intraclastos arredondados de oóides (Ool), pelóides (Pel) e fragmentos de dolarenito (Dar), envoltos em cimento dolomítico; E – Fotomicrografia de dolarenito microconglomerático com fragmentos arredondados de dolarenito (Dar) e pelóides (Pel); F – Brecha dolomítica com fragmentos angulosos de dolomito maciço e dolomito laminado (destaque em amarelo).

#### 3.4.1.8 – Diamictito (*Dia*)

A fácies diamictito (*Dia*), correspondente à fácies de denominação idêntica identificada por Santana (2011) na região de Fagundes, é composta por diamictito com matriz argilo carbonática carbonosa e fragmentos de dolomito, com variações na proporção matriz/arcabouço (Figura 3.6A). Os fragmentos variam desde frações grânulo até blocos. Na base da unidade ocorrem blocos com dimensões de alguns metros de espessura em sondagem, e a rocha possui característica de ortoconglomerado. Ocorre gradação entre ortoconglomerado e paraconglomerado. Todos os

fragmentos identificados são de dolomito e dolarenito, muitas vezes recristalizados e silicificados, e ainda substituídos por sulfetos (Figura 6B). Nessa fácies não foram identificados fragmentos de dolomito estromatolítico, diferentemente da fácies *Dle*.

A matriz é escura, muito fina, composta por sericita, carbonato e matéria carbonosa. Ocorrem grãos tamanhos silte a areia muito fina de quartzo e carbonato. Em algumas porções, principalmente em direção ao topo, quase não são observados fragmentos (em testemunho), indicando a diminuição da sua proporção.

Não foram identificados afloramentos dessa fácies na região estudada, tendo sido a mesma apenas identificada em testemunhos de sondagem o que dificulta na descrição da forma de ocorrência, geometria e contatos.

Indica deposição por processos de avalanche que carregam lama (matriz) e blocos (clastos). O transporte se dá por fluxo denso de alta viscosidade por processo de decantação, com avalanches episódicas (queda de blocos). Azmy et al. (2008) sugerem que essa fácies pode representar registro de sedimentação glacio-marinha, porém nesse trabalho não foram observadas evidências que caracterizem esse processo, assim como por Santana (2011).

#### 3.4.1.9 – Dolossiltito argiloso/pelito carbonático (Dap)

A fácies dolossiltito argiloso/ pelito carbonático (*Dap*) é composta por sequência argilo-dolomítica, composta por dolossiltito argiloso e pelito carbonático, ambos laminados e cinza escuros, e com contribuição de matéria carbonosa (Figura 3.6D). Os dois litotipos são muito semelhantes, distinguindo apenas pela proporção entre carbonato e argilominerais. Os grãos de quartzo e carbonato são tamanho silte, às vezes chegando a areia muito fina, e estão muito deformados, estirados com sombra de pressão e orientados segundo foliação milonítica persistente.

Essa fácies possui laminação plano-paralela, muitas vezes com variação da contribuição de sedimentos carbonosos.

A deposição dessa fácies ocorreu em ambiente de baixa energia, com predomínio de processo de decantação com mistura de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos.

#### 3.4.1.10 – Ritmito pelito-carbonático/arenito (Rpa)

Fácies composta por intercalações de ritmito pelito-carbonático, laminado e ondulado e com contribuição carbonosa, e arenito fino a médio cinza escuro com contribuição carbonosa. Os litotipos ocorrem em diferentes posições na estratigrafia e podem se repetir (Figura 3.6C). O contato normalmente é abrupto.

O ritmito possui laminações com variação da proporção de silte e areia fina. Os grãos são de quartzo e raro plagioclásio, variando de subangulosos a subarredondados. A porção fina da rocha é

composta basicamente por sericita e micrita. Observa-se laminação plano-paralela, muitas vezes ondulada pela ação das ondas.

A porção arenosa possui baixa maturidade textural, com matriz argilo-carbonosa. Os grãos de quartzo variam de areia fina a média. Ocorrem alguns filmes argilosos descontínuos entre os estratos. Em algumas regiões, a rocha é maciça, mas no geral possui laminação, marcas onduladas e estratificação cruzada tabular (Figura 3.6E). Há o predomínio das porções mais argilosas, e ocorrem raros afloramentos em cristas onde ocorre maior proporção de arenito.

Durante a sedimentação dessa fácies houve a alternância de processos de decantação e de tração.

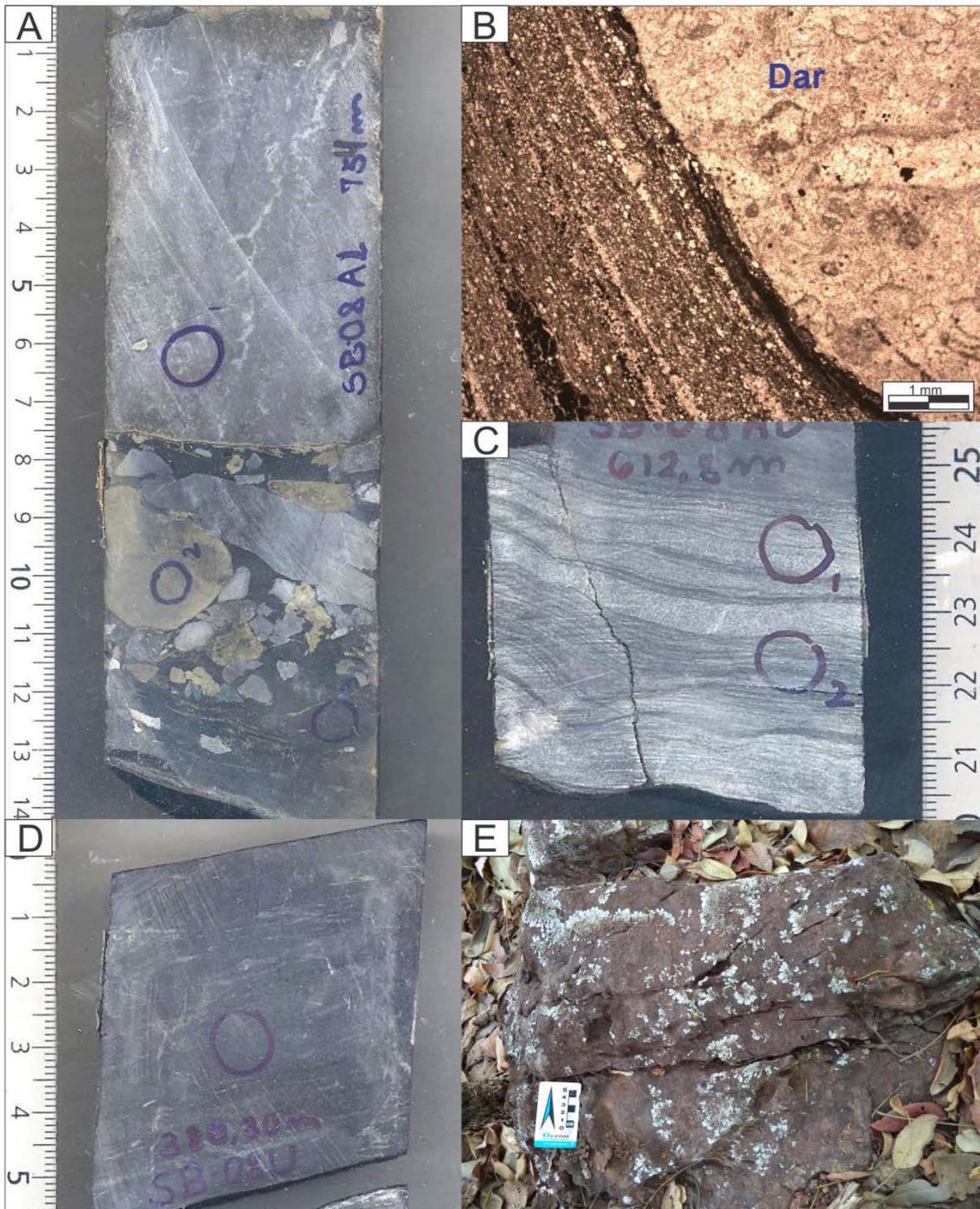


Figura 3.6: Fotos das fácies *Dia*, *Rpa* e *Dap*. A – Fácies *Dia* com fragmentos de dolomito cinza, alguns substituídos por sulfetos, em matriz argilo carbonática carbonosa; B – Fotomicrografia de *Dia* mostrando fragmento de dolarenito intraclástico (Dar) e matriz argilo carbonática carbonosa; C – Fácies *Rpa* com laminações silto-argilosas cinza esverdeadas e arenosas mais claras; D – Fácies *Dap* com rocha argilo carbonática carbonosa cinza escura; E – Estratos cruzados tabulares da fácies *Rpa*.

#### 3.4.1.11 – Dololutito impuro laminado/maciço (Dlm)

Fácies compostos por dololutito e dolossiltito impuros, às vezes laminados e às vezes maciços, ambos argilosos e com matéria orgânica. Existe o predomínio do litotipo laminado. Esse tipo é marcado pela alternância de lâminas de até 1 mm de espessura, mais claras e outras mais

escuras, com diferentes proporções de carbonato e argila (Figura 3.7A). Os grãos são de carbonato e quartzo e são finos, chegando a tamanho silte, e a matriz é micrítica com material carbonoso.

Já o dolomito maciço é composto por cristais de dolomita e grãos de quartzo e matriz argilosa carbonosa. Os grãos são subangulosos a angulosos, muitas vezes aparentando estar recristalizados, com tamanhos médios silte, chegando a areia muito fina. A matriz da rocha é composta por argila e micrita, e matéria orgânica formando filmes escuros associados a cristais euédricos muito finos de pirita.

Essa fácies mostra intensa recristalização da matriz carbonática, com predomínio de cristais de dolomita com cristalinidade variando desde fina a grossa (Figura 3.7B). Apesar disso, muitas vezes ainda guardam a estrutura original da rocha.

A *Dlm* encontra-se intensamente deformada, principalmente quanto maior a proporção de argila. Chegam a ocorrer protomilonitos com porfiroclastos autólitos de porções maciças ou porfiroclastos de cristais de pirita (Figura 3.7C).

A deposição dessa fácies se deu predominantemente por processo de decantação em ambiente carbonático com energia, as vezes variando (laminado), as vezes contínua (maciço).

#### 3.4.1.12 – Dolarenito intraclástico/ Dolarenito intraclástico conglomerático (Dic)

Fácies composta por dolarenito cinza intraclástico com matriz micrítica (Figura 3.7D). Os grãos são predominantemente intraclastos subarredondados a subangulosos com tamanho areia média, chegando a muito grossa e raramente grânulo, e quartzo subanguloso tamanho areia fina a média (Figura 3.7E e Figura 3.7F). A rocha é suportada pelos grãos arranjados em empacotamento normal a apertado, muitas vezes levemente orientados, marcando o acamamento sedimentar. Os intraclastos são constituídos de dolomita com cristalinidade muito fina. O espaço intergranular é preenchido por matriz fina a média e cimento de dolomita esparítica com cristalinidade média. Possui espessura medida variando de 10 m no PSB-06 a 47 m no PSB-08.

Todas as amostras descritas encontram-se intensamente cimentadas e substituídas por grossos cristais de dolomita esparítica ou fibrosa, e mais raramente por sílica com diversas cristalinidades. Foi observada substituição total da rocha por sílica preservando a forma dos grãos. São observados filmes argilosos paralelos ao acamamento, comumente em porções com maior proporção de matriz.

Na deposição dessa fácies havia predomínio de processo de tração, porém com decantação associada. O grau de selecionamento dos grãos indica variação da energia do sistema e pouco retrabalhamento dos grãos.

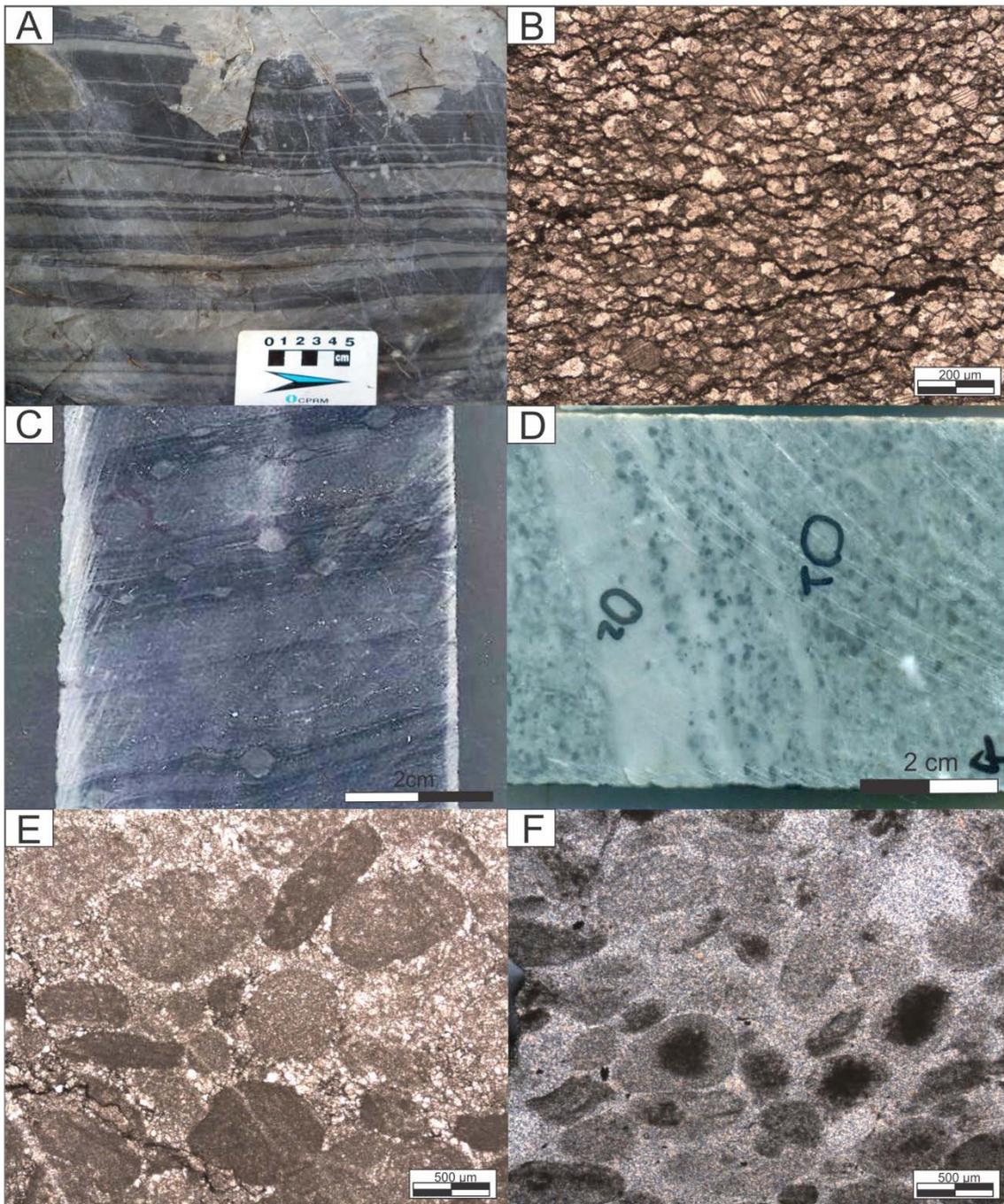


Figura 3.7: Fotos das fácies *Dlm* e *Dic*. A – Afloramento de *Dlm* laminado com porções cinza claro e escuro; B – Dolossiltito intensamente recristalizado com laminações irregulares de matéria carbonosa; C – Protomilonito carbonático com porfiroclastos autólitos; D – Dolarenito grosso cinza claro pertencente à fácies *Dic*; E – Fotomicrografia de dolarenito intraclástico grosso com fragmentos compostos por peloides; F – Fotomicrografia de dolarenito totalmente substituído por sílica microcrstalina, ainda preservando a textura da rocha original.

#### 3.4.2 – Associações de fácies

As fácies descritas foram agrupadas em quatro Associações de Fácies (*AFs*) e relacionadas aos ambientes de sedimentação.

#### 3.4.2.1 – Associação de fácies de plataforma marinha (AF01)

A *AF01* é constituída por sucessão relativamente homogênea de pelito argilo-carbonoso (*Plc*) e ritmito silto-arenoso (*Rsa*), que ocorrem em diversas posições dentro da unidade. O contato entre as fácies é geralmente gradacional. Observa-se tendência do aumento de *Plc* e da contribuição carbonosa em direção ao topo.

Representa deposição em mar aberto, em águas com profundidades moderadas a elevadas, abaixo do nível de interferência de ondas, predominantemente calmas e com períodos episódicos de maior energia. Alternam-se os momentos de quietude, onde depositam as partículas mais finas por decantação, com momentos de maior energia, responsáveis pela deposição de silte e areia por tração. Essas porções mais grossas podem ser interpretadas como associadas a processos de correntes de turbidez em plataforma marinha de baixa declividade e em posição distal.

O ambiente era redutor e rico em matéria orgânica em quase toda a sequência, com a maior concentração de matéria carbonosa em direção ao topo. Possui padrão de empilhamento retrogradacional, com as fácies mais profundas no topo da unidade.

A espessura dessa unidade é desconhecida na região, sendo que o furo PSB-07 interceptou 335 m, sem atravessá-la totalmente. Essa *AF* foi a porção mais basal do Grupo Vazante identificada na região de Paracatu.

A *AF01* pode ser correlacionada à Formação Serra do Garrote (Dardenne, 1998, 2000), classicamente descrita como ardósias cinza, ritmitos e lentes de arenitos posicionados na porção mais basal do Grupo Vazante.

#### 3.4.2.2 – Associação de fácies de recife microbial (AF02)

Na *AF02* ocorre a coexistência de fácies resultantes de processos de alta e de baixa energia em ambiente predominantemente carbonático. A fácies *Dle* representa a *bioherma* estromatolítica *in situ* (fácies tipo recife ou *reef*), desenvolvida em ambiente com intensa atividade biológica e baixa energia. Já as fácies *Dim*, *Bim* e *Dce* mostram o retrabalhamento de *Dle*, indicando representar os entornos do recife (fácies tipo *forereef*) que sofreu ação de ondas e retrabalhamento. O contato entre *Dle* e as fácies retrabalhadas é brusco.

A abundância de dolarenitos (*Dim*) e brechas (*Bim*) com matriz dolarenítica indica intenso retrabalhamento recifal por processos de tração, possivelmente por ondas. Já a presença da fácies *Pcc* evidencia que existiram condições de muito baixa energia próximas ao recife, que possibilitaram a deposição de argila e micrita com matéria orgânica. Possivelmente se tratava de local mais fundo que o recife e protegido por barreiras (laguna ou *back-reef*). Essa porção foi frequentemente perturbada por avalanches episódicas causadas por falhas ativas.

A presença de brechas intraclásticas (*Bim*) e diamictitos (*Dce*), e de falhas sin-sedimentares, evidenciam um substrato instável, com fluxos gravitacionais gerados por falhas e tremores, ativos durante a deposição dessa *AF*.

A seção mais espessa e completa da *AF02* foi levantada no furo PSB-05, localizado sobre a atual mina de Morro Agudo, onde foram descritos 870 m da sequência. A *AF02* pode ser correlacionada à Formação Morro do Calcário proposta por Dardenne (1998, 2000). É a principal sequência carbonática presente entre as cidades de Paracatu e Unaí.

O contato atual entre *AF01* e *AF02* foi identificado como tectônico, marcado por falha reversa de médio a alto ângulo, possivelmente reativada a partir de falha normal sin-sedimentar. Madalosso e Valle (1978) assumem esse contato como faciológico lateral. Porém, a deformação observada no contato dificulta a interpretação sobre a mudança do ambiente de deposição.

#### 3.4.2.3 – Associação de fácies de margem de talude (*AF03*)

A base da *AF03* é marcada pela fácies *Dia*, gradando para *Dap*. A presença dessas duas fácies evidencia ambiente predominantemente calmo com deposição de argila e lama carbonática por decantação, porém com avalanches episódicas (queda de blocos). Ocorre tendência de gradação normal do tamanho dos fragmentos em direção ao topo. Podem estar relacionadas a avalanches submarinas geradas por falhas e tremores, sendo *Dia* representante da porção proximal, e *Dap* da distal.

Associado à *Dap* e *Dia*, posicionada mais para o topo da *AF*, porém ainda intercalada, ocorre a fácies *Rpa*. Representa a presença de fluxos de correntes de tração associados.

A deposição da *AF03* ocorreu em margem de talude, com profundidades moderadas a altas, abaixo do nível de interferência de ondas, instável, frequentemente afetada por tremores e fluxos de detritos. Havia relevante contribuição sedimentar da plataforma carbonática.

O contato entre *AF03* e *AF02* (e.g. nos furos PSB-07 e PSB-08) é marcado por descontinuidade brusca, irregular, reconhecido como um contato erosivo posteriormente tectonizado. Possui espessura máxima descrita no furo PSB-09, superior a 645 m.

Os fragmentos presentes em *Dia* são de dolomitos da *AF02*, o que indica que essa *AF* serviu de área fonte para *AF03*. Os fragmentos da *AF02* são depositados por queda de blocos em local onde se depositava apenas argila.

A *AF03* pode ser relacionada com a base da Formação Serra da Lapa na região de Paracatu, definida por Dardenne (1998, 2000).

#### 3.4.2.4 – Associação de fácies de plataforma carbonática (*AF04*)

A *AF04* foi descrita tanto em sondagem como em afloramentos principalmente na região de Morro Agudo, e em direção a norte ela se torna mais escassa. Representa deposição em plataforma

marinha mista, com maior influencia de sedimentos carbonáticos. Possivelmente a deposição se deu em profundidades moderadas, com também moderado grau de retrabalhamento por processos de tração. Não foram observadas construções estromatolíticas dentro dessa fácies. O contato entre *Dlm* e *Dic* é brusco.

Em relação a *AF03*, a *AF04* ocorre posicionada acima (Figura 3.8B), porém elas ainda podem ocorrer intercaladas, e representa fácies de ambiente mais raso do que a anterior. Interpreta-se que as duas fácies coexistiram lateralmente. O contato entre elas geralmente é brusco, porém muitas vezes é observado como gradacional.

Em direção a norte e a oeste, ocorre o predomínio da *AF03* em relação a *AF04*. Isso se dá provavelmente pelo aprofundamento da bacia em direção a norte, passando a predominar fácies de margem de talude. Isso ainda indica que a região da inflexão do Rio Escuro (Figura 3.3) pode representar um paleoalto da bacia, interferindo no ambiente de sedimentação.

A *AF04* pode ser relacionada à porção superior da Formação Serra da Lapa definida por Dardenne (1998, 2000), compondo o topo do Grupo Vazante.

#### 3.4.3 – Inferências regionais

As quatro *AFs* foram correlacionadas em quatro seções realizadas em testemunhos de sondagem. As sondagens estão localizadas no perfil A-A' (Figura 3.3) nas regiões, de sul para norte, do Morro do Capão (PSB-07), da Mina de Morro Agudo (PSB-05), de Bento Carmelo (PSB-08) e da Serra do Landim (PSB-09) (Figura 3.8A). Foram escolhidas as seções com menor influência tectônica e onde as relações estratigráficas aparentam estar normais.

A Figura 3.8B ilustra as inferências sobre as disposições e continuações laterais e em profundidade das *AFs* descritas na região.

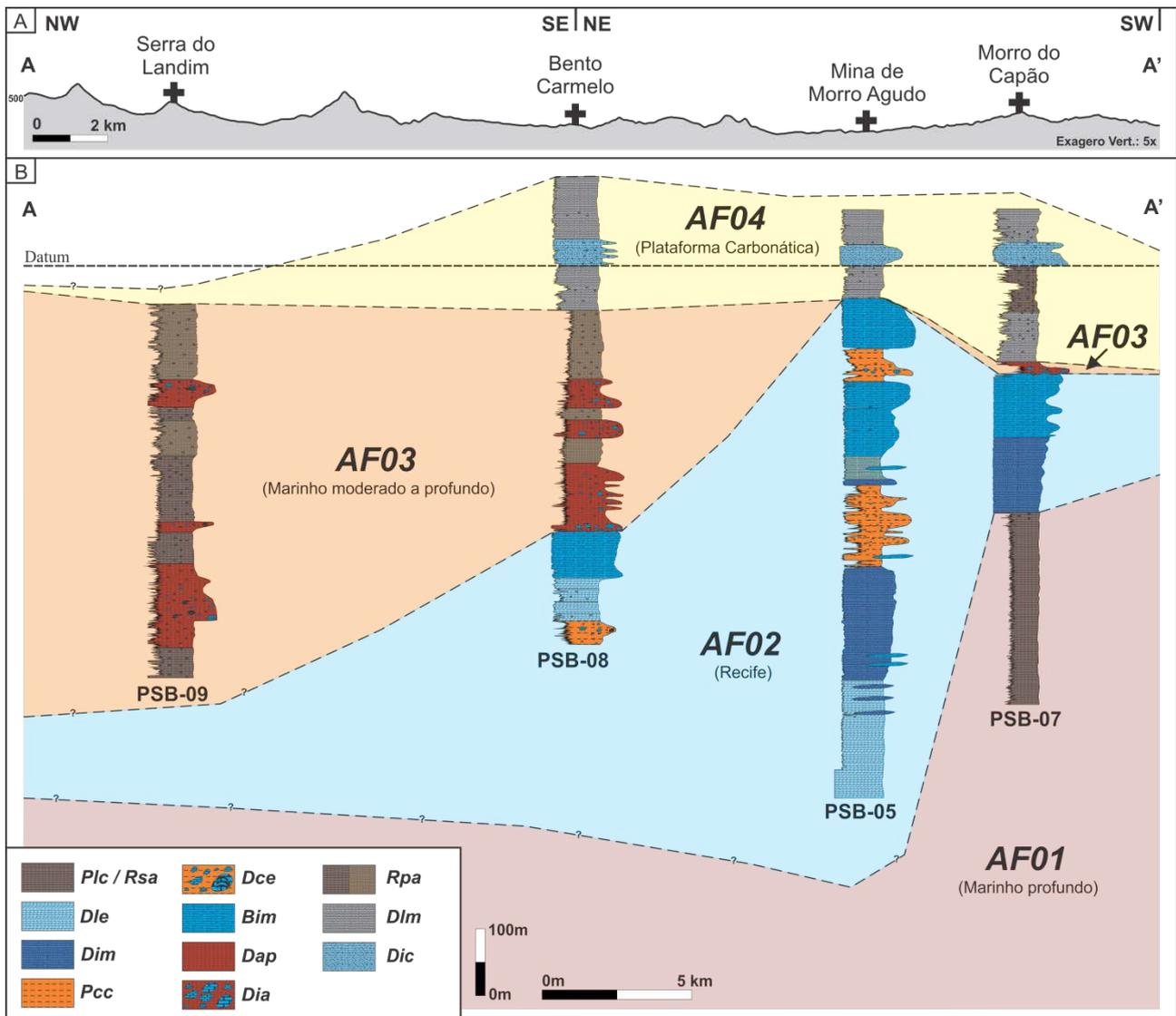


Figura 3.8: Seção estratigráfica do Grupo Vazante na região estudada. A – Localização de cada seção na topografia da região (seção composta A-A’; B – Correlação entre as Associações de fácies descritas nas seções estratigráficas. A base da fácies *Dic* foi usada como Datum. Perfis de sondagem compilados de Dias e Sotero, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d.

A *AF01* ocorre apenas no furo PSB-07 (Figura 8B), na base da sequência interceptada pelos furos. Por não ser interceptado pelos outros furos, o contato com a *AF02* é inferido em profundidade para as outras regiões. Em campo essa *AF* é estendida por grande faixa geográfica, tanto para nordeste como sudeste da área. É contínua e relativamente monótona, com alternância das fácies *Plc* e *Rsa* no decorrer da sua faixa de ocorrência, com a tendência do enriquecimento de *Plc* para o topo.

A *AF02* foi atingida por cinco dos seis furos estudados. A espessura da *AF* afina em direção sul (Figura 3.3 e 3.8B) e tem sua maior espessura observada na região da mina de Morro Agudo. O grande espessamento nessa região pode estar associado a falhas sin-sedimentares com direções ENE-WSW. Dentro dessa *AF*, as fácies *Dim* e *Bim* são contínuas nos topos de todas as seções. As fácies com relevante contribuição argilosa (*Pcc* e *Dce*) não foram observadas na região sul, no

Morro do Capão, mas se tornam comuns em direção a norte, com maior espessura observada no furo PSB-05 (Figura 3.8B). A fácies *Dle* é bem descrita na base da *AF*, principalmente nos furos PSB-05 e PSB-11, com espessa sequência de dolomito estromatolítico e laminado.

A *AF03* mostra tendência de afinamento para S-SW (Figura 3.8B). A menor espessura observada foi vista em Morro do Capão, de 21 m. Já em Morro Agudo não foi observado essa *AF*, com dois possíveis motivos: não deposição, ou a deformação observada nesse contato alterou o empilhamento original. Possui maior espessura vista no PSB-09 e há a tendência do espessamento para norte. Além disso, em direção a norte há o predomínio da fácies *Rpa* sobre as outras.

A *AF04* predomina na região centro a sul da área, afinando em direção a N-NW. As três seções que a interceptam (Figura 3.8B), possuem todas as fácies descritas, com o predomínio de *Dlm*, porém com camada bem marcada de *Dic* que pode ser correlacionada entre os furos.

#### 3.4.4 – *Paleoambientes e evolução da bacia*

Todas as fácies e associações de fácies (*AFs*) descritas foram interpretadas como associadas a processos de sedimentação em ambiente de margem passiva marinha (*e.g.* Madalosso e Valle, 1978; Dardenne, 1998, Santana, 2011). Assume-se ainda que a bacia desenvolveu-se às margens do Paleocôntinente ou Cráton São Francisco (CSF) (Campos-Neto 1984a, 1984b; Almeida, 1977; Dardenne, 1998).

A proposta de evolução deposicional para a porção estudada do Grupo Vazante foi elaborada com base nos dados levantados em furos de sondagem e campo, em trabalhos anteriores (*e.g.* Madalosso e Valle, 1978; Dardenne, 1998; Santanna, 2011; Oliveira, 2013) e em modelos e conceitos de análise de fácies e estratigrafia de sequências (*e.g.* Walker e James, 1992; Catuneanu, 2006; Catuneanu et al., 2009).

Vale salientar que o contato sedimentar basal do Grupo Vazante não foi observado, uma vez que a oeste, a unidade é truncada por falhas de empurrão que o coloca em contato tectônico com o Grupo Bambuí, e em sondagem, não chegou a ser interceptado. Portanto não se conhece a natureza dos estágios mais iniciais do Grupo Vazante na região de Paracatu. No entanto, na região de Lagamar é descrita uma sequência predominantemente carbonática na base da Formação Serra do Garrote, a Formação Lagamar (Dardenne, 1976; Marques et al., 2015).

As Figura 3.9A e 3.9B representam de forma esquemática a evolução da deposição da porção estudada do Grupo Vazante e o posicionamento das *AFs* descritas.

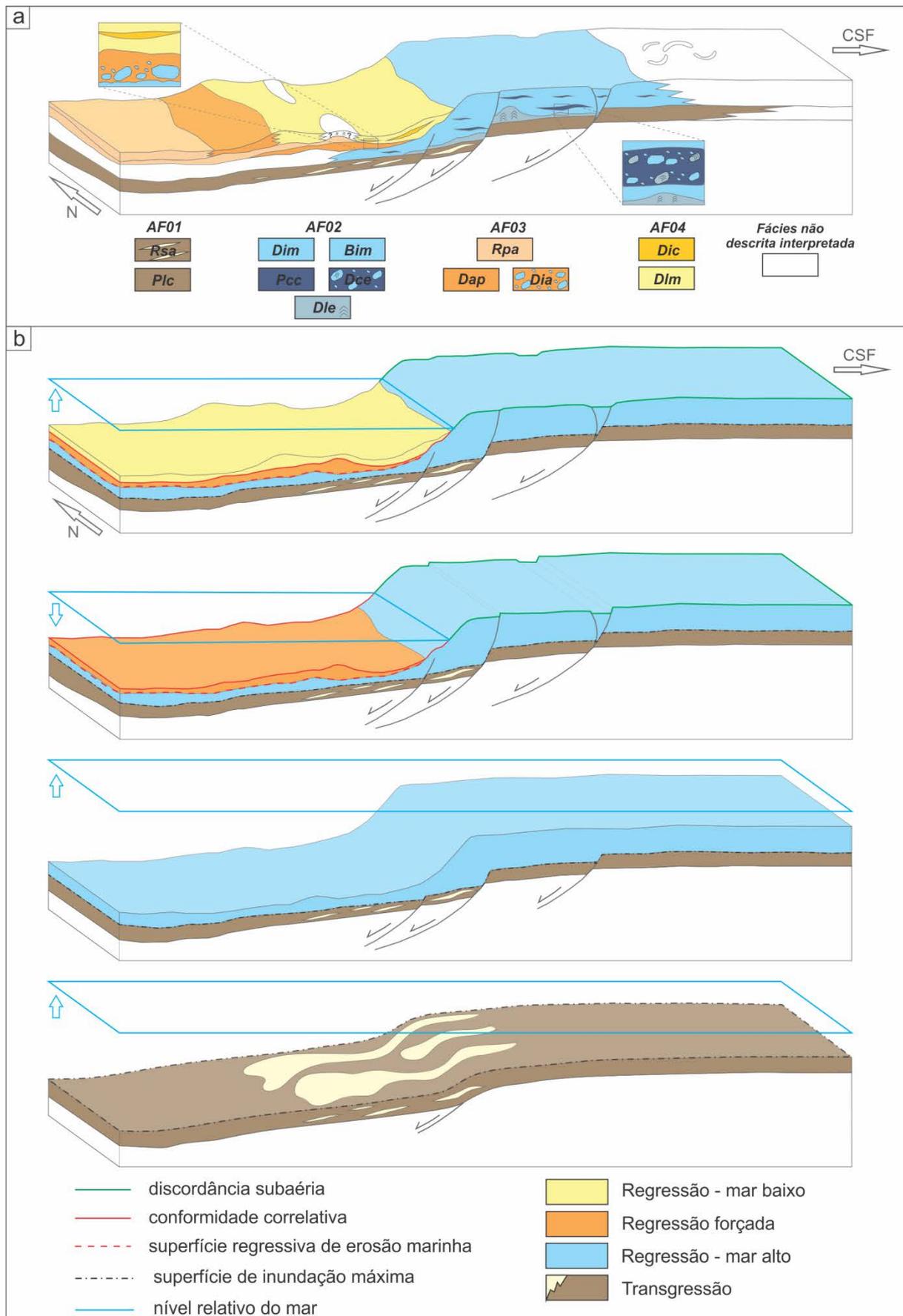


Figura 3.9: Modelo esquemático de evolução da Bacia Vazante. A – Representação simplificada das fácies sedimentares descritas e interpretadas do Grupo Vazante; B – Evolução dos estágios de deposição do Grupo Vazante.

A *AF01* foi a associação de fácies mais basal do Grupo Vazante identificada na região de Morro Agudo (Figura 3.9A). Representa a deposição em plataforma marinha siliciclástica de baixa declividade, em águas com profundidades moderadas a elevadas, com eventos episódicos de correntes de turbidez. Trata-se de uma plataforma de grandes dimensões, visto a distribuição geográfica dessa unidade, principalmente na direção N-S (aproximadamente 250 km), desde as proximidades de Lagamar, a sul, até Unai, a norte.

O padrão de empilhamento retrogradacional das fácies aponta para deposição em regime de transgressão marinha (Figura 3.9B). A porção proximal depositada durante a transgressão não foi observada, porém interpreta-se que seja correlata à Formação Lagamar. O topo da *AF01*, rico em argila e matéria orgânica, pode representar proximidade à superfície de inundação máxima. Essas porções ricas em matéria orgânica podem estar associadas a pontos potenciais para descolamentos tectônicos.

A continuação da subida do nível relativo do mar com geração de espaço de acomodação e maior aporte sedimentar possibilitou a deposição de carbonatos associados ao trato de mar alto (Figura 3.9B). A *AF02* representa deposição em recife com barreiras em borda de plataforma. O ambiente era relativamente raso, com influência de retrabalhamento proximais. A subida do nível do mar com progradação da linha de costa possibilitou que os sedimentos siliciclásticos fossem depositados em posição mais continental, e os carbonáticos na plataforma. A deposição dessa *AF* está associada a falhas normais sin-sedimentares (Figura 3.9a)

Uma regressão forçada expôs a *AF02*, gerando uma superfície erosiva de discordância subaérea (Figura 3.9B).

A *AF03* pode ter sido depositada em trato de sistema do estágio de queda ou de regressão forçada, onde é muito comum a erosão das fácies mais elevadas e deposição em porção mais distal. O ambiente era de margem de talude, com profundidades moderadas a altas, abaixo do nível de interferência de ondas, instável, frequentemente afetada por fluxo denso de detritos que erodem na plataforma exposta e ao mesmo tempo em que se depositam diamictitos e turbiditos na quebra do talude. Essa *AF* teve como principal área fonte de fragmentos a *AF02*. O contato entre as duas unidades é marcada por uma superfície basal de regressão forçada (Figura 3.9B).

Com a retomada da subida do nível relativo do mar e aumento da acomodação (trato de mar baixo), depositou-se a *AF04*, e ainda a *AF03* em posição mais distal (Figura 3.9B). A deposição da *AF04* se deu em plataforma carbonática, em profundidades moderadas, com pouco retrabalhamento por processos proximais.

O contato entre as *AF03* e *AF04* é de difícil delimitação, uma vez que as litologias podem ocorrer intercaladas (Figura 3.9A). Os empilhamentos e espessuras (Figura 3.8B) de *AF03* e *AF04*

observados sugerem que na região mais a sul da área, a profundidade da bacia era menor do que em direção a norte.

Os topos da *AF03* (quando não sotoposto pela *AF04*) e da *AF04* são truncados por falhas de empurrão com mergulho para oeste que colocam a Formação Serra do Landim em contato tectônico. Isso dificulta a interpretação dos processos sedimentares dominantes na deposição do topo das unidades estudadas.

### **3.5 – Conclusões**

As fácies levantadas do Grupo Vazante na região de Paracatu são produtos de processos de sedimentação em ambiente de margem passiva marinha mista, de baixa declividade e com relevante atuação de falhas sin-sedimentares.

As *AFs* descritas variam lateralmente de espessura e composição. Além disso, há o predomínio de uma em relação à outra, dependendo da sua posição geográfica (*e.g.* *AF03* e *AF04*), indicando que o paleorelevo da bacia atuou de maneira importante na deposição das fácies. Nesse sentido, a inflexão do Rio Escuro indica se tratar de um paleoalto geográfico que já existiria durante a deposição e influenciou na deposição do Grupo Vazante.

A porção estudada do Grupo Vazante representa um ciclo quase completo de subida e descida do nível relativo do nível do mar. São descritos registros de trato de sistema transgressivo (*AF01*), trato de mar alto (*AF02*), trato de regressão forçada (*AF03*) e de mar baixo (*AF03* e *AF04*). As presentes interpretações foram realizadas com observações de campo e dos testemunhos, mas não se descarta a possibilidade do empilhamento observado ter sido originado por tectonismo compressivo e que apenas estudos mais detalhados, com base em novas sondagens e estudos isotópicos (datações e perfilagem estratigrafia isotópica), poderiam comprovar a hipótese.

#### 4. ESTRATIGRAFIA ISOTÓPICA

Este capítulo apresenta os principais resultados e discussões da avaliação da preservação da assinatura primária, estratigrafia isotópica (C e O) e tentativa de correlação dos carbonatos do Grupo Vazante na região de Morro Agudo. O capítulo está estruturado na forma do artigo (em preparação) “*Estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa, topo do Grupo Vazante, na região do Morro Agudo*”.

**Resumo:** Rochas do Grupo Vazante na região de Morro Agudo integram uma sequência argilo-carbonática composta por doze fácies sedimentares e quatro associações de fácies (AFs), que indicam deposição em ambiente de margem passiva marinha mista. A quimioestratigrafia isotópica de carbono e oxigênio é uma ferramenta amplamente aplicada na reconstrução de paleoambientes e correlações regionais de sequências carbonáticas proterozoicas, desde que preservem suas assinaturas primárias. Dois testemunhos estratigráficos foram amostrados em alta resolução (intervalo de 3 m), foi avaliado o grau de preservação das amostras por critérios petrográficos e químicos, e foram geradas as curvas isotópicas ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ). Apesar da pervasiva dolomitização secundária ( $\text{Mg}/\text{Ca} > 0,5$ ) e hidrotermalismo frequente, a maioria das amostras pode ser classificada como dolomito pouco alterado, com algumas exceções. As amostras da Formação Serra do Landim foram as que apresentam maior grau de alteração, juntamente com pequeno grupo de dolomitos coletados em intervalo mineralizado em esfalerita, no topo da Formação Morro do Calcário. Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  variam entre -4,57 e 2,52 ‰<sub>VPDB</sub> e -11,07 e -1,63 ‰<sub>VPDB</sub>, respectivamente. Os perfis isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  gerados são marcados por valores predominantemente positivos (~2 ‰) para a Formação Morro do Calcário seguido por importante incursão negativa acima da fácies diamictito, e posterior tendência positiva para o topo. Os fragmentos dolomíticos que compõem os diamictitos possuem assinatura isotópica muito semelhante à vista na Formação Morro do Calcário e distinta dos dolomitos da Formação Serra da Lapa, indicando grande potencial de que a primeira serviu como área fonte para a AF03. Os resultados isotópicos obtidos em amostras do Grupo Vazante são coerentes com valores de carbonatos proterozoicos e as curvas isotópicas são passíveis de correlação com outras regiões do Grupo Vazante. Tendo como base essa correlação, infere-se que as porções Norte e Sul do Grupo Vazante foram depositadas em uma mesma bacia, ou em bacias com alguma conexão, possivelmente separadas (em parte) pela elevação do Rio Escuro.

**Palavras-chave:** Estratigrafia isotópica; Grupo Vazante; Dolomitos; Correlação estratigráfica.

## 4.1 – Introdução

O Grupo Vazante aflora na região noroeste do estado de Minas Gerais e corresponde a uma sequência argilo-dolomítica marinha de aproximadamente 5 km de espessura, estruturada em uma faixa contínua com direção N-S de aproximadamente 250 km, com largura variando de 25 a 30 km. Ocorre desde a região de Lagamar, a sul, até Unaí, a norte, passando pelos municípios de Vazante e Paracatu.

A região de Morro Agudo está situada a sul da cidade de Paracatu. Nela ocorre a Mina de zinco e chumbo de Morro Agudo, que juntamente com os depósitos de Vazante, Ambrósia e Fagundes, todos hospedados em unidades do Grupo Vazante (Dardenne *et al.*, 1998; Dardenne, 2000), compõem a principal província zincífera do Brasil. Tratam-se de mineralizações hidrotermais de zinco hospedadas em rochas carbonáticas (Dardenne, 1972; 1978; Romagna & Costa, 1988; Monteiro, 1997; 2002). Os carbonatos (dolomitos) na região de Paracatu pertencem às formações de topo do Grupo Vazante: Morro do Calcário e Serra da Lapa.

Rochas do Grupo Vazante vem sendo objeto de vários trabalhos recentes, principalmente de estudos estratigráficos e relacionados aos depósitos minerais (*e.g.* Madalosso & Valle, 1978; Rigobello *et al.*, 1988; Freitas-Silva & Dardenne, 1997; Monteiro, 2002; Monteiro *et al.*, 2006; Paniago, 2011). Estudos geoquímicos também vêm ganhando relevância (*e.g.* Azmy *et al.*, 2001; 2006; 2008; Oliveira, 2013).

Neste artigo são apresentados os dados de estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio de amostras coletadas em dois testemunhos estratigráficos de 900,0 e 953,2 metros de espessura na região de Morro Agudo, aqui denominada Grupo Vazante Norte. Dados quimioestratigráficos e isotópicos contínuos não estavam disponíveis anteriormente para essas unidades na região, configurando uma lacuna no entendimento da evolução deposicional e química do Grupo Vazante, unidade importante na estratigrafia da Zona Externa da Faixa Brasília e nas mineralizações de zinco e chumbo. Os principais objetivos desse artigo são (1) avaliar a preservação das amostras e se os valores medidos de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  refletem a composição isotópica primária do oceano; (2) estabelecer perfis quimioestratigráficos isotópicos da porção do Grupo Vazante Norte através de análises contínuas de alta resolução em dois testemunhos estratigráficos; (3) avaliar as mudanças nas condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia Vazante; e (4) discutir a correlação regional com o Grupo Vazante Sul.

## 4.2 – Contexto geológico

O Grupo Vazante está inserido no domínio da Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1967; 1977; 1981), um sistema orogênico colisional de grandes dimensões desenvolvido no

Neoproterozoico com a aglutinação de três cratons: Amazônico, São Francisco e Paranapanema/Rio de La Plata (Dardenne, 2000). Está localizado na borda oeste do Craton São Francisco. Fazem parte da Província Tocantins as faixas Brasília, Araguaia e Paraguai.

Mais especificamente, o Grupo Vazante faz parte do domínio tectônico da Zona Externa ou Cinturão de Dobras e Empurrões da Faixa Brasília, caracterizadas por cinturões de dobras e cavalgamentos com vergência para leste (Fuck, 1994; Fuck *et al.*, 2005). Nesse contexto, pertence à porção mais externa do orógeno, junto ao limite cratônico (Figura 4.1a), e é composta por seqüências metassedimentares (baixo grau) dobradas e empurradas (Dardenne, 2000).

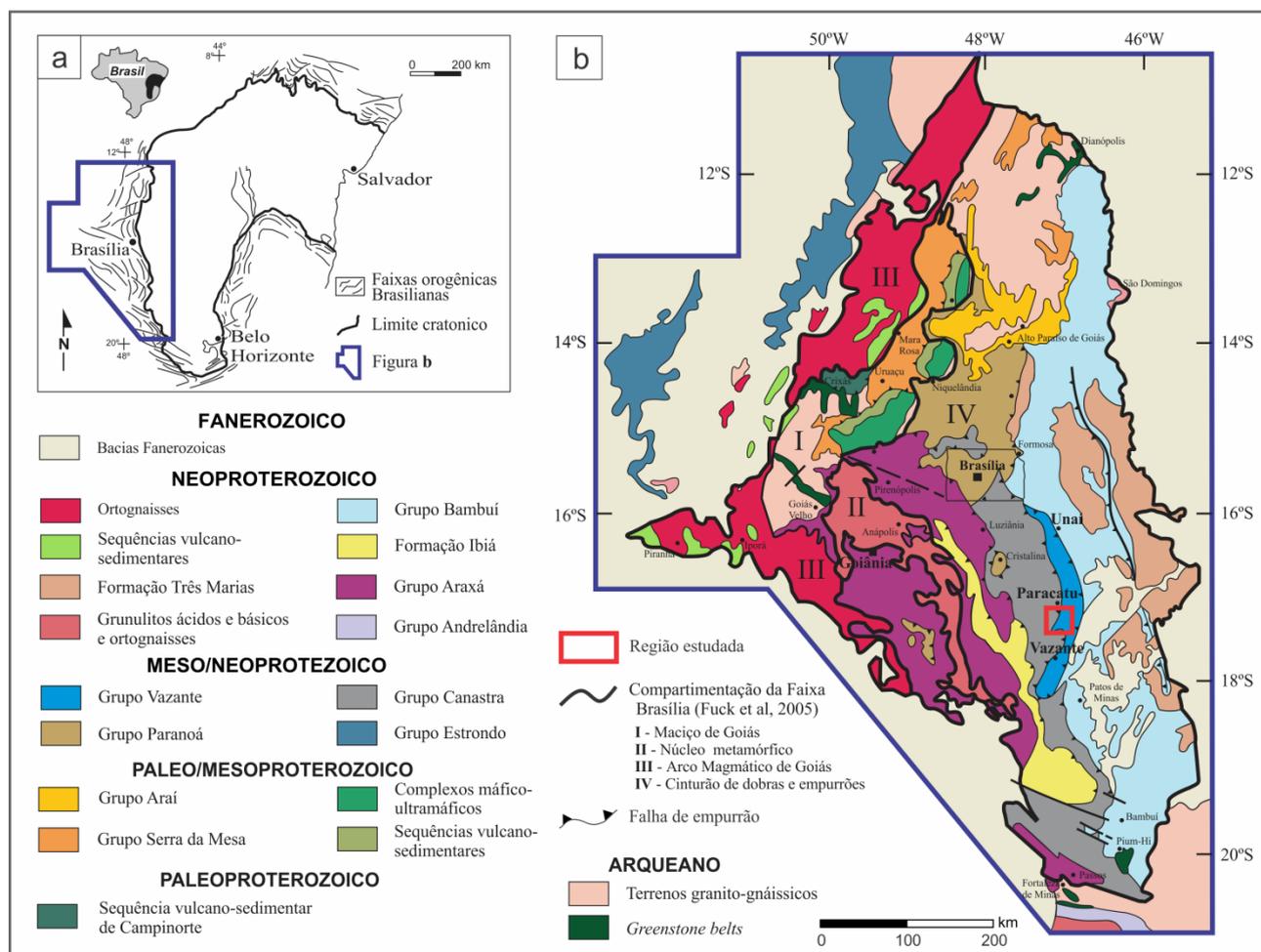


Figura 4.1: Mapa Tectônico e localização da área. a – Localização da Faixa Brasília no contexto do Cráton São Francisco (limite cratônico compilado de Alkmim & Teixeira, 2017); b – Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília (Dardenne, 2000) e compartimentação tectônica proposta por Fuck *et al.* 2005.

A faixa de ocorrência do Grupo Vazante, denominada Faixa Vazante (Dardenne *et al.*, 1998; Dardenne, 2000), estende-se por cerca de 250 km na direção N-S, com largura variando de 25 a 30 km, e pode ser dividida em dois domínios, norte e sul, separados pela inflexão do Rio Escuro (Figura 4.1b). Essa inflexão também faz a separação entre os domínios de ocorrência de mineralizações de zinco silicatado (sul) e sulfetado (norte), e ainda das unidades hospedeiras.

As camadas estão estruturadas por falhas inversas e de empurrão, e dobras assimétricas com vergência para leste, e afetadas por falhas normais tardias. A maior parte das falhas convergentes é de baixo ângulo, compondo contatos e duplicamentos tectônicos. As falhas de empurrão, associadas a dobras abertas, possibilitam a formação de *klippen* sinformes. Ocorrem também falhas de alto ângulo, possivelmente geradas por inversão de falhas normais. São observadas principalmente no contato entre as formações Serra do Garrote e Morro do Calcário, quase sempre de alto ângulo.

Apesar da deformação, hidrotermalismo e metamorfismo sobrepostos, Dardenne (2000) descreve que as relações estratigráficas permaneceram bem preservadas na região.

#### 4.2.1 – Grupo Vazante na região de Morro Agudo

Na Região de Morro Agudo (Figura 4.2) afloram da base para o topo, as formações litoestratigráficas Serra do Garrote, Morro do Calcário e Serra da Lapa, do Grupo Vazante. Além dessas, ainda ocorrem a Formação Serra do Landim e o Grupo Canastra.

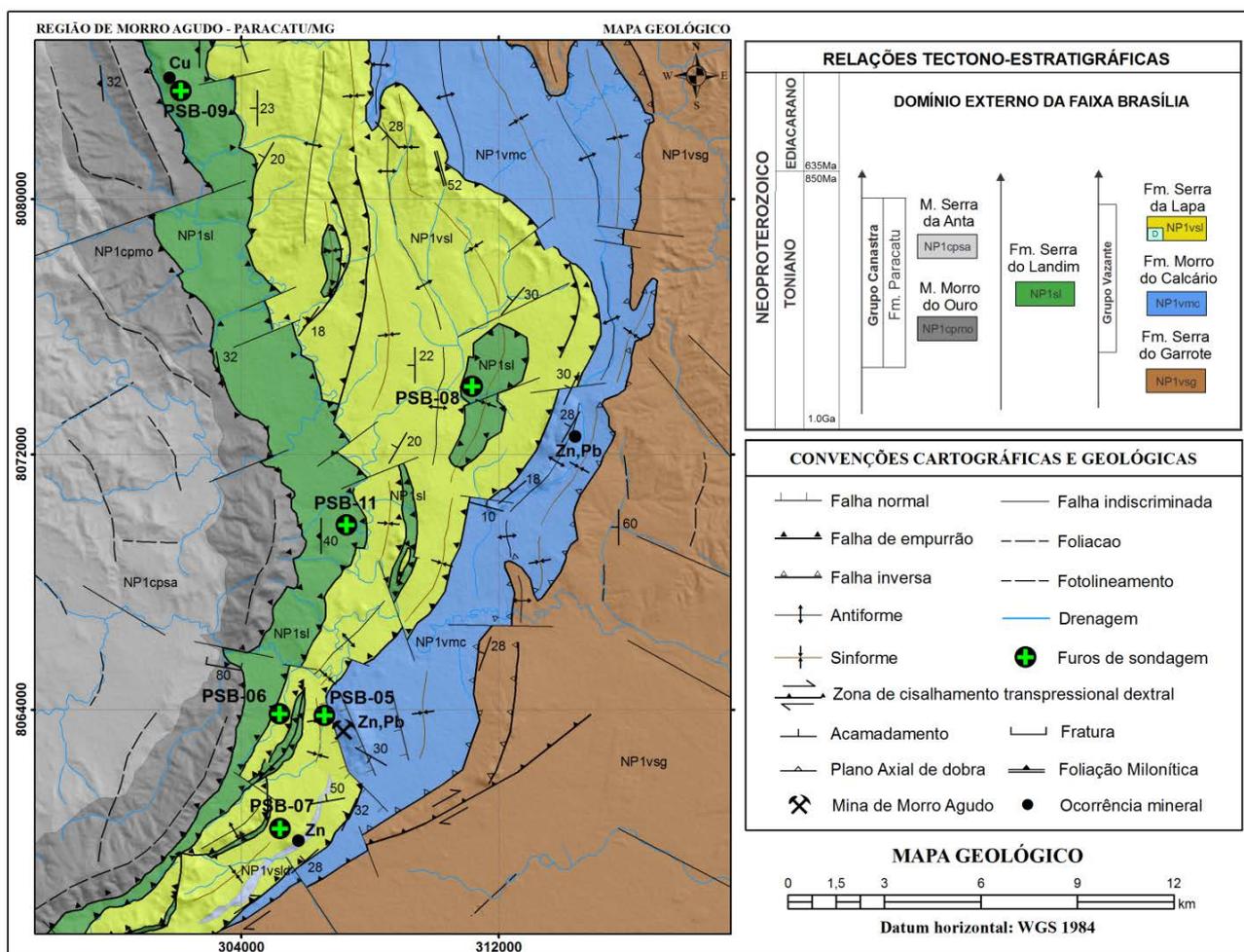


Figura 4.2: Mapa geológico da região de Morro Agudo, Paracatu-MG (modificado de Dias *et al.*, 2018).

A Formação Serra do Garrote é composta por um pacote relativamente homogêneo de pelito negro, carbonoso, finamente laminado e com intercalação de lâminas e camadas de ritmito silto-

arenoso, também carbonoso, e de esparsas lentes de arenito fino a médio. A espessura dessa unidade ultrapassa 936,5 m no furo PSB-10 (a norte da região de Morro Agudo).

Estratigraficamente acima, ocorre a Formação Morro do Calcário, composta por uma espessa (superior a 870 m) sequência dolomítica (dolomito laminado, dolarenito intraclástico, dolorrudito e brecha intraclástica) com intercalações de camadas de pelito carbonático com fácies diamictito. O contato entre as duas formações se dá por falha reversa de médio a alto ângulo.

A Formação Serra da Lapa recobre a Formação Morro do Calcário. A espessura dessa unidade ultrapassa 640 m (PSB-09). O contato com a Formação Morro do Calcário é identificado como erosivo tectonizado, porém muitas vezes é visto apenas como tectônico por falha de empurrão. É composta por pacote contendo pelito carbonático carbonoso, diamictito, dolomito laminado, dolarenito, ritmito silto-argiloso e arenito.

Na região de Morro Agudo, são descritas doze fácies sedimentares, agrupadas em quatro Associações de Fácies (*AFs*), que compõem o pacote sedimentar do Grupo Vazante (Figura 4.3).

Litoestratigrafia		Estruturas	Regime de sistemas	Associação de fácies	Fácies	Descrição das fácies	Processos e ambiente de sedimentação	
Grupo Vazante	Fm. Serra da Lapa		Regressão - mar baixo	AF04	<i>Dic</i>	dolomito intraclástico e dolarenito médio a conglomerático, maciços e mal selecionados.	retrabalhamento por tração e fluxo de detritos de carbonatos. Plataforma carbonática.	
					<i>Dlm</i>	dololuto impuro laminado a maciço. Laminações plano-paralelas.	decantação e tração em plataforma carbonática.	
					<i>Rpa</i>	ritmito pelito-carbonato-arenito. Laminação plano-paralela e estratificação cruzada.	margem de talude afetada por corrente de turbidez.	
					<i>Dap</i>	dolomito argiloso com laminação plano-paralela.	decantação em margem talude.	
	Fm. Morro do Calcário		Regressão - mar alto	SBRF	AF02	<i>Dia</i>	diamictito com fragmentos dolomíticos da AF02.	fluxo de detritos em margem talude.
						<i>Bim</i>	brecha dolomítica e dolarenítica, intraclásticas com fragmentos moderadamente a mal selecionados, angulosos a subarredondados.	retrabalhamento por tração e fluxo de detritos carbonáticos próximo ao recife.
						<i>Dim</i>	dolarenito intraclástico médio a grosso, com oólitos pisólitos. Pouca ou nenhuma matriz.	retrabalhamento por tração de carbonato em zona próxima ao recife.
						<i>Pcc</i>	pelito carbonático com matéria orgânica. Laminação plano-paralela.	decantação em ambiente calmo.
						<i>Dce</i>	diamictito com fragmentos de dolomito e dolomito estromatolítico.	fluxo de detritos e retrabalhamento de fragmentos de dolarenitos, dololutos e dolomito laminado e estromatolítico..
						<i>Dle</i>	dolomito laminado com estromatólitos colunares e bio-laminações. Falhas sin-sedimentares.	recife com intensa atividade biológica.
Fm. Serra do Garrote		Transgressão	SIM	AF01	<i>Plc</i>	pelito negro carbonoso com laminação plano-paralela.	decantação em ambiente marinho profundo. Condição redutora.	
					<i>Rsa</i>	ritmito silto-arenoso com matéria orgânica. Laminação plano-paralela, as vezes ondulada.	alternância de processos de decantação e tração. Mar profundo afetado por correntes de turbidez.	
<b>Litologias</b> 					<b>Estruturas sedimentares</b> 			

Figura 4.3: Coluna estratigráfica esquemática da região de Morro Agudo: litoestratigrafia, regime de sistemas, Associações de Fácies, fácies e os processos e ambientes de sedimentação (baseado em Sotero *et al.*, 2019). SIM – superfície de inundação máxima; SBRF – superfície basal de regressão forçada.

As fácies descritas indicam que a deposição dessa sequência ocorreu em ambiente de margem passiva marinha mista carbonática-siliciclástica. A associação basal (AF01) é composta por pelitos (Figura 4.4a) e ritmitos silto-arenosos carbonosos, representando sedimentação em plataforma marinha profunda de baixa declividade, em regime de transgressão marinha.

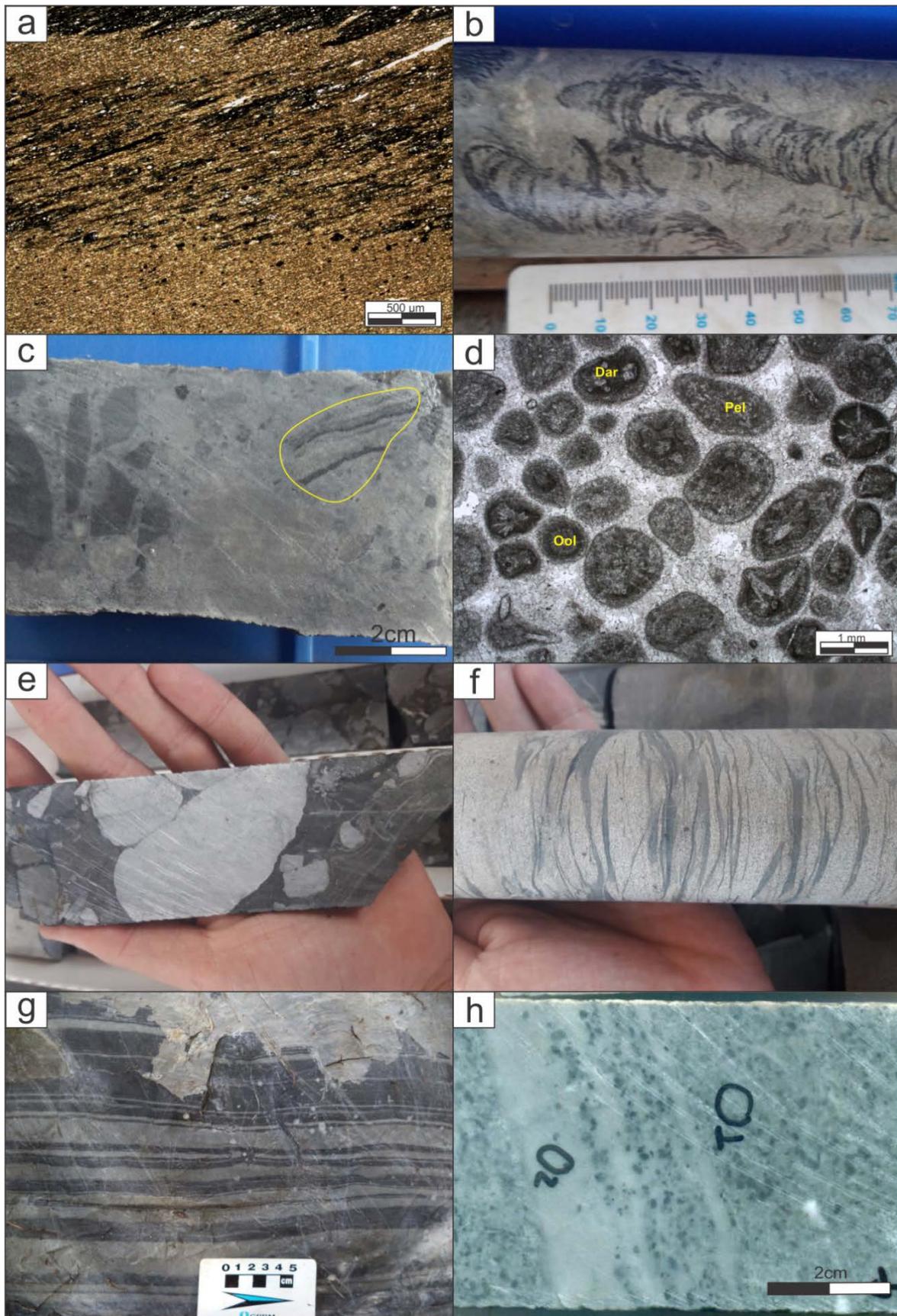


Figura 4.4: Fácies sedimentares do Grupo Vazante. a – Fotomicrografia de pelito laminado (*Plc*) com variação na proporção de matéria carbonosa; b – Amostra de dolomito estromatolítico (*Dle*); c – brecha dolomítica com clastos de dolomito maciços e laminados (*Bim*); d – Dolarenito oolítico (*Dim*); e – Diamictito com matriz argilosa e clastos dolomíticos (*Dia*); f – Ritmito silto-arenoso (*Rpa*); g – Dolomito laminado (*Dlm*); h – Dolarenito intraclástico (*Dic*).

Após a inunda  o máxima, em trato de mar alto, iniciou-se a deposi  o da *AF02* em ambiente de recife com barreiras em borda de plataforma, composta por dolomitos laminados com estromatólitos (Figura 4.4b), brechas dolomíticas e dolareníticas (Figura 4.4c), dolarenitos (Figura 4.4d) e ainda pelitos carbonáticos carbonosos com fácies diamictito. O contato entre as *AF01* e *AF02*    marcado por uma superfície sedimentar interpretada como de inunda  o máxima (SIM).

O abaixamento do nível relativo do mar gerou uma regressão forçada e a deposi  o da *AF03* em trato de sistema do estágio de queda.    composta, na base, por diamictito argilo-carbonoso com fragmentos de *AF02* (Figura 4.4e), passando a pelito e ritmito silto-arenoso (Figura 4.4f), depositados em região de margem de talude. A base da *AF03*    marcada por superfície basal de regressão forçada (SBRF).

A retomada da subida do nível relativo do mar proporcionou a deposi  o da *AF04* e ainda da continua  o da *AF03* em posi  o mais distal. A *AF04*    composta por dololutitos argilosos laminados (Figura 4.4g) e maciços, e dolarenitos intraclásticos (Figura 4.4h) depositados em plataforma marinha carbonática.

O padrão de empilhamento observado sugere que a deposi  o de todas as unidades ocorreu progressivamente, em processo de subida do nível relativo do mar (tratos transgressivos e mar alto), de queda (regressão forçada) e da retomada da subida (mar baixo).

### 4.3 – Materiais e métodos

Foram utilizados para descri  o das unidades, seis testemunhos de sondagens (Figura 4.2) realizados na região, totalizando 5.911,9 metros. Na coleta de amostras para os estudos isotópicos foram escolhidos dois destes testemunhos, que apresentam estratigrafia mais completa e melhor preservada (PSB-07 e PSB-08 – Tabela 4.1). Os testemunhos e os dados de sondagem utilizados foram obtidos pelo Projeto de Sondagem Bambuí (PSB) – DNPM/CPRM realizado nas décadas de 1970 e 1980 (Brandalise *et al.*, 1980).

Tabela 4.1: Localiza  es geográficas e profundidades dos furos PSB-07 e PSB-08. As coordenadas UTM possuem Datum SAD-69, na zona 23S.

<b>Furo</b>	<b>UTM-E</b>	<b>UTM-N</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Toponímia</b>	<b>Município/UF</b>
<b>PSB-07</b>	305182,0	8060269,0	900,0	Morro do Capão	Paracatu/MG
<b>PSB-08</b>	311164,0	8074116,0	953,2	Bento Carmelo	Paracatu/MG

Foram coletadas 214 amostras de fácies carbonáticas (dolomíticas) para determina  o das razões isotópicas de carbono e oxigênio nos dois testemunhos, distanciados 15 km entre si. As amostras foram coletadas com espaçamento de 3 m. Os dois furos selecionados atravessam toda a sequência dolomítica das forma  es Morro do Calcário e Serra da Lapa na região, sendo que o

testemunho do furo PSB-07 chega até a unidade basal do Grupo Vazante, a Formação Serra do Garrote.

Na coleta foram evitadas amostras com características macro e microscópicas de alteração hidrotermal, principalmente silicificação, sulfetação e mineralizações, e ainda regiões truncadas por falhas ou veios. Tendo em vista a dificuldade de identificar a alteração hidrotermal em toda a sequência, foram utilizados resultados pontuais de Fluorescência de Raios-X Portátil (FRXp) para orientar a coleta.

Os locais selecionados foram perfurados com o auxílio de uma furadeira de mesa convencional e broca  $\varnothing$  4,0 mm, e o pó resultante foi coletado, após rejeição do pó inicial (de superfície).

Para determinação das razões  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , foram amostrados aproximadamente 300  $\mu\text{g}$  de pó de carbonato. A abertura química do material a ser analisado foi feita utilizando-se  $\text{H}_3\text{PO}_4$  a 72 °C. As análises foram realizadas por espectrômetro de massa de fonte gasosa *Finnigan Gas Bench II* com a opção “carbonato”, que contém amostrador automático com preparação de amostra assistida e interface com *loop* de injeção, com sistema de fluxo contínuo acoplado ao espectrômetro de massa *Finnigan DELTA plus Advantage*. As análises foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG-UnB).

Foram coletadas sete amostras de rocha durante as descrições das sondagens para determinação dos elementos maiores. As amostras foram analisadas no laboratório analítico SGS GEOSOL. Para a preparação, as amostras passaram por secagem, britagem e posterior pulverização a 150 mesh (0,106 mm). Foram analisadas por Fluorescência de Raios-X com fusão por Metaborato de Lítio, para determinação dos elementos maiores e ICP-OES/MS por digestão multiácida ( $1\text{HCl}/1\text{HNO}_3/1\text{HF}/1\text{HClO}_4$ ) para determinação dos elementos traços.

#### **4.4 – Resultados**

Todos os novos dados analíticos gerados nesse trabalho são apresentados na Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4. Os resultados também são exibidos em gráficos de dispersão elementar e/ou isotópicos, e ainda em perfis estratigráficos de valores versus profundidade.

As rochas analisadas são predominantemente dolomitos quase puros a pouco argilosos, com porcentagens de carbonato (dolomita) aproximando-se de 85 a 100% (em volume – petrografia).

##### *4.4.1 – Elementos químicos*

Elementos maiores e traços, como Ca, Mg, Fe, Mn e Sr, foram analisados em sete amostras de carbonato dos dois testemunhos (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Resultados químicos obtidos em carbonatos do Grupo Vazante. Mc – Formação Morro do Calcário; Lp – Formação Serra da Lapa; Sl – Formação Serra do Landim.

amostra	prof.	unidade	litotipo	Mg/Ca	Sr (ppm)	Sr/Ca (*)	Mn (ppm)	Mn/Sr	Fe (ppm)	Fe/Sr
MP-001	563,0	Mc	dolarenito	0,60	58	0,27	77	1,3	769	13,2
MP-051	355,2	Mc	dolarenito	0,58	137	0,65	1704	12,4	10001	73,0
MP-119	818,3	Mc	dolarenito	0,59	84	0,38	1007	12,0	4826	57,7
MP-125	788,8	Mc	dolarenito	0,60	75	0,34	77	1,0	1679	22,3
MP-087	202,3	Lp	dol laminado	0,57	76	0,63	1471	19,5	18744	248,3
MP-094	136,7	Lp	dolarenito	0,53	140	0,84	2401	17,1	33221	237,1
MP-191	110,2	Sl	filito carb	0,52	133	1,52	620	4,7	43363	326,3

\* valor da razão multiplicado por 1000.

As razões Mg/Ca são todas superiores a 0,50, evidenciando que os carbonatos são ricos em magnésio. Os valores obtidos de estrôncio são baixos, inferiores a 150 ppm. Apenas uma amostra coletada em outro testemunho chegou a 300 ppm, mostrando que os carbonatos do Grupo Vazante tem a característica de baixos teores de Sr. A razão Sr/Ca varia entre  $0,27 \times 10^{-3}$  e  $1,54 \times 10^{-3}$ , considerados baixos comparados aos valores médios da água do mar moderna ( $8,6 \times 10^{-3}$  – Drever, 1988). Os valores de Mn possuem grande variação, de 77 a 2.401 ppm. Razões Mn/Sr mostram baixos valores, abaixo de 20. Teores de ferro são elevados no geral, variando de 769 a 43.363 ppm. Os valores mais elevados estão relacionados a porções piritosas, comumente presentes nos dolomitos argilosos. Razões Fe/Sr variaram de 13,2 a 326,3, distribuídos em dois domínios de  $<73$  ( $n = 4$ ) e  $>227$  ( $n = 3$ ).

Os teores de elementos maiores e traços (Ca, Mg, Sr, Mn e Fe) analisados, bem como das razões elementares, estão dentro dos limites observados em vários trabalhos no Grupo Vazante (e.g. Azmy *et al.*, 2001; 2006).

#### 4.4.2 – Isótopos de carbono e oxigênio

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  foram determinados em 214 amostras de carbonatos (dolomitos) do Grupo Vazante na região de Morro Agudo (Tabela 4.3 e Tabela 4.4). Todos os valores são relatados como per mil (‰) relativos aos padrões *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB) para  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ . O erro associado é de 0,05 ‰ para as análises de  $\delta^{13}\text{C}$  e de 0,10 ‰ para as de  $\delta^{18}\text{O}$ . Os valores médios para cada unidade estão representados na Tabela 4.5.

Tabela 4.3: Resultados das análises de isótopos estáveis (C e O) do furo PSB-07. Mc: Morro do Calcário; Lp: Serra da Lapa; Sl: Serra do Landim.

amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$	amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$
MP-001	563,0	dolarenito	Mc	2,13	-4,34	MP-048	364,6	dolarenito	Mc	1,69	-3,59
MP-002	558,8	dolomito	Mc	2,25	-1,63	MP-049	361,6	dolarenito	Mc	1,51	-3,44
MP-003	555,7	dolarenito	Mc	1,83	-4,84	MP-050	358,4	dolarenito	Mc	1,88	-3,27
MP-004	552,0	dolomito	Mc	2,01	-3,40	MP-051	355,2	dolarenito	Mc	2,10	-3,01
MP-005	548,0	dolomito	Mc	1,96	-3,27	MP-052	352,2	dolarenito	Mc	2,31	-3,07
MP-006	544,8	dolomito	Mc	2,10	-4,15	MP-053	348,7	dolarenito	Mc	2,47	-3,45
MP-007	526,0	dolarenito	Mc	1,98	-5,27	MP-054	344,9	dolarenito	Mc	2,16	-3,63
MP-008	521,1	dolarenito	Mc	1,87	-5,62	MP-055	341,5	dolarenito	Mc	2,07	-2,77
MP-009	518,0	dolarenito	Mc	2,33	-5,33	MP-056	337,5	dolarenito	Mc	1,95	-2,56
MP-010	516,1	dolarenito	Mc	1,79	-3,79	MP-057	331,5	fragmento	Lp	1,92	-6,44
MP-011	510,8	dolarenito	Mc	1,99	-6,56	MP-058	327,2	fragmento	Lp	1,84	-4,62
MP-012	507,2	dolarenito	Mc	2,09	-3,32	MP-059	306,7	dolomito	Lp	-2,35	-8,90
MP-013	503,4	dolarenito	Mc	1,67	-4,56	MP-060	303,0	dolomito	Lp	-3,47	-9,98
MP-014	501,6	dolarenito	Mc	1,94	-4,58	MP-061	300,0	dolomito	Lp	-1,55	-5,29
MP-015	496,8	dolarenito	Mc	2,15	-5,40	MP-062	196,4	dolomito	Lp	-2,00	-6,51
MP-016	494,0	dolarenito	Mc	2,52	-4,68	MP-063	293,9	dolomito	Lp	-1,16	-6,20
MP-017	491,2	dolarenito	Mc	2,21	-4,90	MP-064	287,8	dolomito	Lp	-1,90	-6,00
MP-018	488,3	dolarenito	Mc	1,96	-5,98	MP-065	283,7	dolomito	Lp	-3,01	-7,50
MP-019	485,0	dolarenito	Mc	2,02	-5,89	MP-066	280,8	dolomito	Lp	-1,88	-6,71
MP-020	482,3	dolarenito	Mc	2,21	-5,86	MP-067	277,3	dolomito	Lp	-1,81	-5,46
MP-021	478,8	dolarenito	Mc	1,47	-6,29	MP-068	274,2	dolomito	Lp	-1,99	-6,08
MP-022	475,4	dolarenito	Mc	2,13	-5,77	MP-069	269,8	dolomito	Lp	-1,77	-5,46
MP-023	472,9	dolarenito	Mc	2,02	-5,63	MP-070	266,6	dolomito	Lp	-1,56	-6,51
MP-024	463,1	dolarenito	Mc	1,11	-7,36	MP-071	262,4	dolomito	Lp	-2,96	-8,49
MP-025a	460,0	dolarenito	Mc	2,17	-4,21	MP-072	255,0	dolomito	Lp	-4,32	-8,62
MP-025b	457,0	dolarenito	Mc	2,11	-6,16	MP-073	252,2	dolomito	Lp	-4,18	-7,96
MP-026	453,1	dolarenito	Mc	2,13	-3,75	MP-074	249,4	dolomito	Lp	-3,41	-6,56
MP-027	450,3	dolarenito	Mc	1,80	-3,28	MP-075	245,7	dolomito	Lp	-3,25	-6,58
MP-028	446,4	dolarenito	Mc	1,70	-3,78	MP-076	242,2	dolomito	Lp	-3,26	-6,86
MP-029	444,3	dolarenito	Mc	2,29	-4,97	MP-077	238,1	dolomito	Lp	-3,23	-7,94
MP-030	438,8	dolarenito	Mc	1,84	-4,94	MP-078	231,8	dolomito	Lp	-3,24	-8,22
MP-031	435,0	dolarenito	Mc	2,02	-3,84	MP-079	227,5	dol lam	Lp	-4,57	-9,56
MP-032	430,2	dolarenito	Mc	2,02	-3,84	MP-080	224,6	dolomito	Lp	-3,30	-6,63
MP-033	427,5	dolarenito	Mc	2,05	-3,15	MP-081	220,3	dolomito	Lp	-1,38	-5,63
MP-034	424,0	dolarenito	Mc	2,05	-4,66	MP-082	217,4	dolomito	Lp	-1,53	-6,11
MP-035	421,5	dolarenito	Mc	1,27	-4,26	MP-083	214,9	dolomito	Lp	-2,16	-7,29
MP-036	417,8	dolarenito	Mc	2,11	-5,97	MP-084	211,5	dolomito	Lp	-1,19	-8,38
MP-037	414,0	dolarenito	Mc	1,98	-3,29	MP-085	208,8	dolomito	Lp	-1,17	-8,32
MP-038	411,0	dolarenito	Mc	1,95	-2,54	MP-086	205,0	dolomito	Lp	-0,04	-8,56
MP-039	407,5	dolarenito	Mc	2,38	-3,29	MP-087	202,3	dol lam	Lp	-1,00	-9,01
MP-040	404,6	dolarenito	Mc	2,26	-5,51	MP-088	198,4	dolomito	Lp	-2,33	-9,21
MP-041	401,0	dolarenito	Mc	2,14	-6,43	MP-089	183,4	dolomito	Lp	-4,36	-9,69
MP-042	398,2	dolarenito	Mc	1,91	-3,57	MP-090	181,6	dol lam	Lp	-4,30	-9,66
MP-043	393,6	dolarenito	Mc	1,68	-3,39	MP-091	178,1	dol lam	Lp	-4,47	-9,68
MP-044	390,3	dolarenito	Mc	1,74	-2,00	MP-092	156,8	dolomito	Lp	-2,86	-7,80
MP-045	386,1	dolarenito	Mc	2,34	-5,31	MP-093	151,6	dolomito	Lp	-3,23	-7,82
MP-046	372,3	dolarenito	Mc	2,18	-2,24	MP-094	136,7	dolarenito	Lp	-1,98	-7,03
MP-047	368,8	dolarenito	Mc	1,78	-1,70	MP-095	134,0	dolarenito	Lp	-3,82	-8,94

Tabela 4.3 (continuação)

amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$	amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$
MP-096	129,0	dolarenito	Lp	-0,57	-8,59	MP-107	93,6	dolomito	Lp	0,82	-5,69
MP-097	127,1	dolarenito	Lp	0,93	-5,44	MP-108	87,5	dolarenito	Lp	-0,33	-6,70
MP-098	123,7	dolarenito	Lp	0,43	-6,26	MP-109	84,1	dolomito	Lp	0,02	-5,66
MP-099	121,8	dolarenito	Lp	-0,18	-6,22	MP-110	80,3	dol lam	Lp	-2,81	-6,15
MP-100	117,7	dolarenito	Lp	-0,34	-5,71	MP-111	78,0	dolomito	Lp	-1,93	-6,45
MP-101	114,5	dolarenito	Lp	-0,17	-6,58	MP-112	69,4	dolomito	Lp	1,36	-5,85
MP-102	108,3	dolarenito	Lp	0,52	-7,70	MP-113	67,0	dol lam	Lp	-1,65	-6,48
MP-103	105,0	dolarenito	Lp	0,63	-7,78	MP-114	62,9	dol lam	Lp	-1,52	-7,43
MP-104	102,4	dolarenito	Lp	1,04	-7,03	MP-115	51,3	dolomito	Lp	-1,97	-7,07
MP-105	99,1	dolarenito	Lp	0,94	-6,73	MP-116	46,6	dolomito	Lp	-0,02	-6,75
MP-106	96,2	dolomito	Lp	1,22	-5,66	MP-117	39,2	dolomito	Lp	1,39	-5,94

Tabela 4.4: Resultados das análises de isótopos estáveis (C e O) do furo PSB-08. Mc: Morro do Calcário; Lp: Serra da Lapa; Sl: Serra do Landim.

amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$	amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$
MP-118	821,3	dolarenito	Mc	1,04	-10,23	MP-158	276,7	dolarenito	Lp	-1,59	-9,22
MP-119	818,3	dolarenito	Mc	1,53	-6,20	MP-159	269,0	dolarenito	Lp	-1,16	-7,90
MP-120	807,6	dolarenito	Mc	1,32	-10,22	MP-160	266,6	dolarenito	Lp	-0,94	-8,10
MP-121	804,0	dolarenito	Mc	1,42	-10,20	MP-161	262,6	dolarenito	Lp	-1,14	-9,48
MP-122	798,4	dolarenito	Mc	1,26	-8,94	MP-162	259,2	dolarenito	Lp	-0,93	-7,25
MP-123	795,2	dolarenito	Mc	1,36	-7,70	MP-163	256,6	dolarenito	Lp	1,73	-10,54
MP-124	792,5	dolarenito	Mc	1,09	-10,18	MP-164	252,8	dolarenito	Lp	-1,40	-7,47
MP-125	788,8	dolarenito	Mc	1,26	-11,07	MP-165	250,2	dolomito	Lp	-1,63	-8,30
MP-126	785,9	dolarenito	Mc	1,08	-10,74	MP-166	236,2	dolomito	Lp	-0,26	-7,33
MP-127	782,4	dolarenito	Mc	1,18	-10,09	MP-167	233,2	dolomito	Lp	-0,40	-6,90
MP-128	779,5	dolarenito	Mc	1,21	-10,16	MP-168	230,2	dolomito	Lp	-0,51	-6,12
MP-129	776,2	dolarenito	Mc	1,28	-9,07	MP-169	226,9	dolomito	Lp	-0,26	-6,32
MP-130	773,0	dolarenito	Mc	1,15	-5,56	MP-170	224,2	dolomito	Lp	0,21	-6,45
MP-131	771,2	dolarenito	Mc	1,09	-8,52	MP-171	213,0	dolomito	Lp	0,64	-6,01
MP-132a	766,4	dolarenito	Mc	0,81	-7,79	MP-172	209,2	dolomito	Lp	1,26	-6,66
MP-132b	763,0	dolarenito	Mc	0,86	-7,39	MP-173	206,2	dolomito	Lp	0,80	-5,27
MP-133	759,3	dolarenito	Mc	2,00	-5,36	MP-174	203,6	dolomito	Lp	0,81	-5,73
MP-134	756,7	fragmento	Lp	-0,84	-5,18	MP-175	199,6	dolomito	Lp	0,96	-5,58
MP-135	748,2	fragmento	Lp	1,10	-5,65	MP-176	196,3	dolomito	Lp	0,97	-6,42
MP-136	743,5	fragmento	Lp	0,89	-6,34	MP-177	194,0	dolomito	Lp	1,31	-6,72
MP-137	367,9	dol lam	Lp	-2,34	-9,12	MP-178	184,0	dolomito	Lp	-0,40	-7,53
MP-138	364,4	dolomito	Lp	-2,51	-8,79	MP-179	181,0	dolomito	Lp	-0,74	-6,60
MP-139	359,6	dolomito	Lp	-2,37	-9,11	MP-180	178,7	dolomito	Lp	-0,76	-6,99
MP-140	352,5	dolomito	Lp	-2,14	-8,47	MP-181	175,2	dolomito	Lp	-0,70	-7,32
MP-141	349,6	dol lam	Lp	-2,40	-9,24	MP-182	172,2	dolomito	Lp	-0,70	-7,24
MP-142	345,2	dolomito	Lp	-1,81	-8,58	MP-183	169,1	dolomito	Lp	-0,70	-7,29
MP-143	342,4	dolomito	Lp	-1,93	-9,43	MP-184	166,0	dolomito	Lp	-0,70	-6,87
MP-144	325,9	dolomito	Lp	-1,25	-9,31	MP-185	163,5	dolomito	Lp	-0,61	-5,99
MP-145	322,0	dol lam	Lp	-1,13	-7,94	MP-186	145,6	filito carb	Sl	0,09	-6,86
MP-146	318,6	dolomito	Lp	-0,34	-8,15	MP-187	144,4	filito carb	Sl	0,08	-7,00
MP-147	315,8	dol lam	Lp	0,34	-7,85	MP-188	139,4	filito carb	Sl	-0,25	-7,78
MP-148	312,1	dolomito	Lp	0,27	-7,95	MP-189	122,9	filito carb	Sl	-0,55	-9,18
MP-149	308,8	dolomito	Lp	0,51	-8,05	MP-190	118,2	filito carb	Sl	-0,88	-10,09
MP-150	306,0	dolomito	Lp	0,59	-8,01	MP-191	110,2	filito carb	Sl	-0,94	-10,32
MP-151	302,5	dol lam	Lp	-0,04	-8,73	MP-192	824,5	dolarenito	Mc	0,69	-5,56
MP-152	296,1	dol lam	Lp	-1,66	-7,76	MP-193	827,6	dolarenito	Mc	1,28	-4,89
MP-153	292,6	dol lam	Lp	-0,86	-8,12	MP-194	831,8	dolarenito	Mc	0,65	-6,19
MP-154	289,3	dolomito	Lp	0,54	-7,66	MP-195	834,7	dolarenito	Mc	0,09	-6,68
MP-155	286,4	dolomito	Lp	-1,07	-8,44	MP-196	837,3	dolarenito	Mc	0,39	-5,86
MP-156	282,7	dolarenito	Lp	-1,01	-7,86	MP-197	840,7	dolarenito	Mc	0,16	-7,94
MP-157	279,0	dolarenito	Lp	-1,06	-8,77	MP-198	850,0	dolarenito	Mc	-0,24	-6,14

Tabela 4.4 (Continuação).

amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$	amostra	prof.	litotipo	unidade	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$
MP-199	854,1	dolarenito	Mc	-0,34	-6,88	MP-206	877,8	dolomito	Mc	-1,91	-6,80
MP-200	857,3	dolomito	Mc	-0,85	-8,45	MP-207	888,4	dolomito	Mc	-2,00	-6,15
MP-201	860,1	dolomito	Mc	-0,66	-8,60	MP-208	891,9	dolomito	Mc	-1,84	-5,59
MP-202	863,3	dolarenito	Mc	-2,14	-9,62	MP-209	894,9	dolomito	Mc	-2,03	-5,46
MP-203	869,3	dolomito	Mc	-2,76	-10,17	MP-210	897,4	dolomito	Mc	-2,04	-5,61
MP-204	871,4	dolarenito	Mc	-2,36	-10,83	MP-211	911,3	dolarenito	Mc	0,53	-5,73
MP-205	873,9	dolomito	Mc	-2,09	-9,28	MP-212	953,0	dolomito	Mc	-0,27	-7,17

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  variam entre -4,57 e 2,52 ‰<sub>VPDB</sub>, com média de 0,03 ‰, e *background* regional determinado pela mediana de 0,18 ‰. Plotados em perfil estratigráfico (versus profundidade), os dados mostram valores predominantemente positivos para a Formação Morro do Calcário, e negativos para as formações Serra da Lapa e Serra do Landim (Figura 4.7). Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam entre -11,07 e -1,63 ‰<sub>VPDB</sub>, com média de -6,65 ‰<sub>VPDB</sub> e *background* regional de -6,58 ‰<sub>VPDB</sub>. Os valores são quase em sua totalidade negativos (VPDB) com raras incursões positivas (Figura 4.7).

As incursões negativas e positivas observadas nos perfis isotópicos podem representar variações estratigráficas deposicionais relevantes ou reações de alteração pós-deposicionais.

## 4.5 – Discussões

### 4.5.1 – *Diagênese e alteração hidrotermal*

As variações isotópicas medidas em rochas carbonáticas são importantes indicadores que permitem avaliar as mudanças das condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia de sedimentação, desde que os valores medidos reflitam os valores primários (no tempo da deposição) e não tenham sido modificados posteriormente, principalmente pela diagênese e hidrotermalismo. Tendo isso em vista, os dados devem ser analisados buscando identificar os efeitos da alteração pós-deposicional nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ .

Para avaliação de alterações diagenéticas, foram utilizados dados de petrografia e resultados químicos e isotópicos. Além dos valores absolutos, podem ser utilizadas dispersões que correlacionam os resultados obtidos (Figura 4.5).

Os resultados exibidos no gráfico  $\delta^{13}\text{C}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 4.5a) estão pouco deslocadas para a esquerda do campo da litificação primária, indicando a ocorrência de alteração (moderada) pós-deposicional por diagênese ou dolomitização em quase toda a sequência. Os dados desse trabalho mostram grande coerência com de outras rochas neoproterozoicas compiladas no mundo (Knauth & Kennedy, 2009).

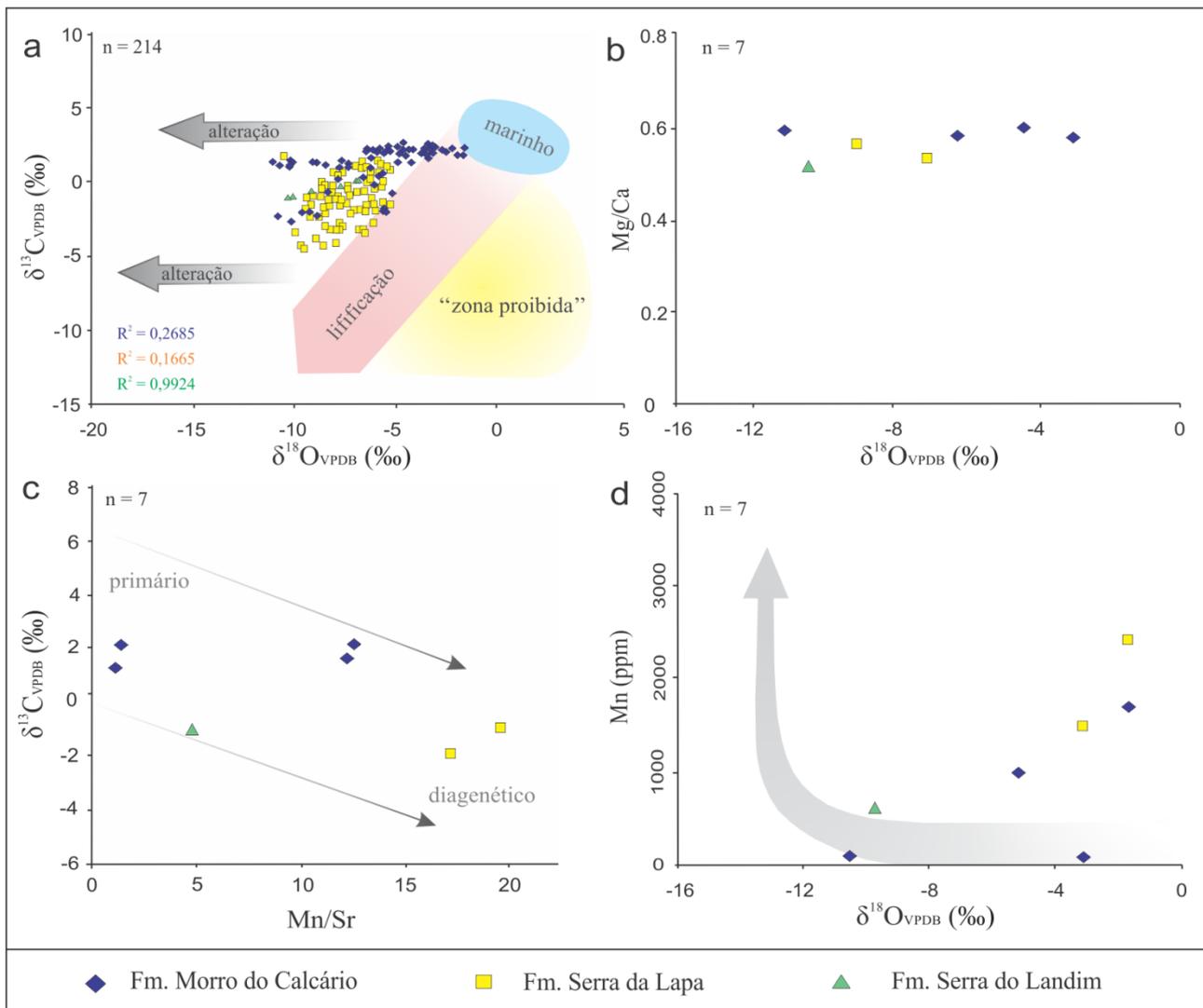


Figura 4.5: Dispersão de resultados analíticos. a – Correlação  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$  versus  $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$  apresentados sobre campos compilados (Knauth & Kennedy, 2009). Os valores de  $R^2$  representam os coeficientes de determinação das amostras de cada unidade; b – Razão Mg/Ca versus  $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$ ; c –  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{VPDB})}$  versus Mn/Sr indicando grau de alteração diagenética (Derry *et al.*, 1992); d – Valor de Mn versus  $\delta^{18}\text{O}_{(\text{VPDB})}$  com *trend* de alteração (Bartley *et al.*, 2001).

O sistema isotópico de precipitados marinhos é altamente influenciado pelas águas subterrâneas e meteóricas durante a litificação, produzindo uma relação aproximadamente covariante entre  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  (Knauth & Kennedy, 2009). A falta de correlação observada para a maioria dos dados sugere que os processos não alteraram de forma significativa a assinatura primária das rochas (Figura 4.5a). Os resultados das formações Morro do Calcário e Serra da Lapa estão pouco ajustados à tendência, 26,85% e 16,65%, respectivamente. Apenas as amostras da Formação Serra do Landim apresentaram forte ajustamento (99,24%), indicando se tratarem das rochas mais alteradas. Esse maior grau de alteração também é visto em dados de campo e petrografia, onde existem fortes indícios de deformação e metamorfismo (chega a ocorrer biotita metamórfica) e hidrotermalismo.

Os valores obtidos da razão Mg/Ca indicam intensa dolomitização em toda sequência carbonática do Grupo Vazante. A dolomita é o principal mineral que compõem os carbonatos analisados. Já a calcita está presente apenas em veios e bolsões hidrotermais, que não foram analisados. O gráfico da Figura 4.5b mostra que as variações de  $\delta^{18}\text{O}$  possuem baixa correlação com a razão Mg/Ca, sugerindo que as concentrações desse isótopo são praticamente independentes do grau de dolomitização.

O conjunto de amostras analisado contém baixas concentrações de Sr e variáveis de Mn, indicando uma possível interação dos carbonatos com fluidos diagenéticos, que geralmente empobrecem os carbonatos em Sr e enriquecem em Mn. Alguma perda de Sr pode estar relacionada à dolomitização, onde os fluidos dolomitantes possivelmente eram depletados em estrôncio, devido à contribuição de água meteórica (Azmy *et al.*, 2001).

Os valores de Mn obtidos são em média superiores à maioria dos carbonatos neoproterozoicos (<1000 ppm) (Yoshioka *et al.*, 2003; Frimmel, 2009), porém com amostras com valores absolutos inferiores (n = 3) e superiores (n = 4). Concentrações elevadas de Mn já foram relatadas em outros carbonatos neoproterozoicos como resultantes de ambientes deposicionais anóxicos ou subóxicos (*e.g.* Feng *et al.*, 2010). Altas concentrações de Mn também podem ser atribuídas à alterações diagenéticas (Kaufman & Knoll, 1995; Derry, 2010). Em amostras inalteradas, os valores de manganês costumam ser baixos (Kaufman *et al.*, 1991)

As razões Mn/Sr de carbonatos são amplamente utilizadas como indicador de alteração de carbonatos (*e.g.* Kaufman & Knoll, 1995). No entanto, estudos em diferentes unidades carbonáticas apresentaram resultados discrepantes quanto aos valores para amostras “bem preservadas” e “alteradas” (Azmy *et al.*, 2006). Os valores de Mn/Sr obtidos nesse trabalho são baixos no geral, indicando baixa alteração diagenética.

A baixa correlação entre os valores de Mn/Sr e  $\delta^{13}\text{C}$  (Figura 4.5c) sugere razoável grau de preservação das amostras. Azmy *et al.* (2006) sugerem que isso se dá porque os fluidos diagenéticos não contêm concentração de  $\text{CO}_2$  suficiente para redefinir a assinatura isotópica dos carbonatos do Grupo Vazante. Apenas as duas amostras da Formação Serra da Lapa caem no campo de amostras possivelmente alteradas diageneticamente (Figura 4.5c).

É comum em amostras alteradas do Neoproterozoico o enriquecimento em Fe e Mn, e baixos a muito baixos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (Bartley *et al.*, 2001). Nas amostras analisadas, não foi observada a correlação entre Fe e Mn e, além disso, a Figura 4.5d mostra o aumento dos valores de Mn seguido dos de  $\delta^{18}\text{O}$ , indicando baixa alteração das amostras.

Também foi avaliado o grau de alteração hidrotermal das amostras. Para tal, os resultados foram comparados com trabalhos que analisaram isotopicamente as rochas do Grupo Vazante (Monteiro *et al.*, 2007; Rubo & Monteiro, 2010; Cordeiro *et al.*, 2018 – Figura 4.6).

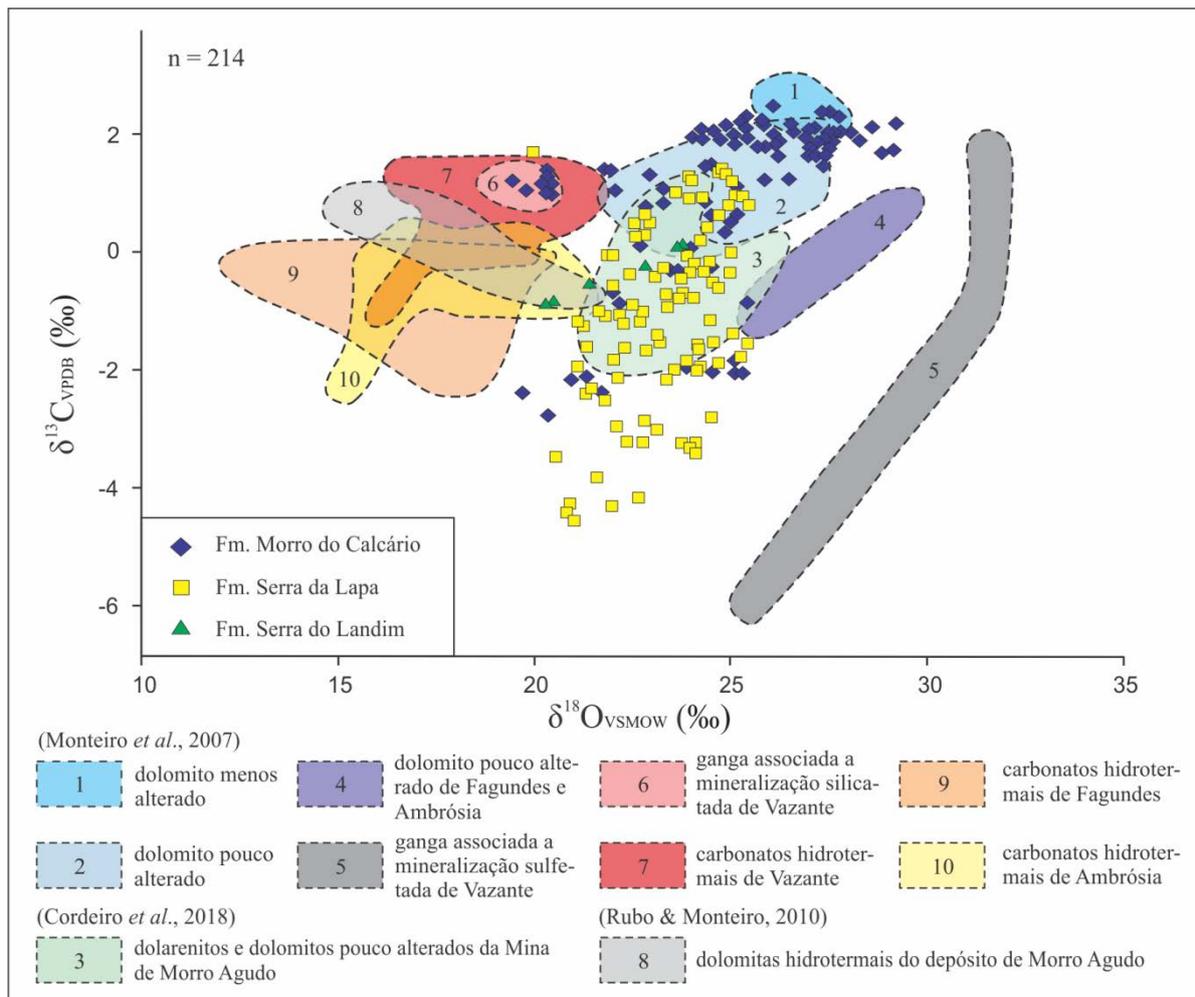


Figura 4.6: Classificação dos dolomitos do Grupo Vazante baseada em relação  $\delta^{13}\text{C}_{\text{(VPDB)}}$  versus  $\delta^{18}\text{O}_{\text{(VSMOW)}}$ . Os valores apresentados de  $\delta^{18}\text{O}$  são calibrados em relação ao padrão VSMOW, que podem ser calculados a partir do valor de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{(VPDB)}}$  (Coplen *et al.*, 1983).

A maior parte das amostras da Formação Morro do Calcário (64%) cai no campo de dolomitos pouco alterados (campo 2). O restante está espalhado no gráfico e uma relevante população (n = 8) está inserida no campo de ganga associada à mineralização silicatada de Vazante e de carbonatos hidrotermais de Vazante (campos 6 e 7). Essas amostras estão concentradas em intervalo marcado por mineralização hidrotermal de esfalerita (ZnS) e galena (PbS) (Figura 4.7).

Os resultados da Formação Serra da Lapa apresentam maior dispersão. Encontram-se principalmente (72%) nos campos de dolomitos pouco alterados e dolomitos pouco alterados de Morro Agudo (campos 2 e 3). O restante das amostras cai fora dos campos delimitados.

Metade das amostras da Formação Serra do Landim (n = 3) está inserida no campo dos dolomitos pouco alterados de Morro Agudo (campo 3) e a outra metade no campo das dolomitas hidrotermais de Morro Agudo e dos carbonatos hidrotermais de Ambrósia (campos 8 e 10).

A maior parte das amostras analisadas nesse trabalho pode ser classificada como dolomito pouco alterado por dolomitização e hidrotermalismo, com algumas amostras mais alteradas.

Portando os resultados obtidos devem representar a assinatura isotópica primária da água do mar ao tempo da deposição preservada ou pouco alterada.

#### 4.5.2 – Estratigrafia isotópica (C e O)

Com base na discussão anterior sobre diagênese e alteração hidrotermal, admite-se que as amostras dos furos PSB-07 e PSB-08 estão relativamente bem preservadas e as razões isotópicas são adequadas para estudos quimioestratigráficos. A variação medida das concentrações dos isótopos de C e O em um perfil estratigráfico permite avaliar as mudanças das condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia de sedimentação da unidade na época da deposição (Halverson *et al.*, 2005; 2010).

A curva isotópica observada para a Formação Morro do Calcário possui valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -2,76 e 2,52 ‰<sub>VPDB</sub>, com média em 1,23 ‰<sub>VPDB</sub> (Tabela 4.5 e Figura 4.8), predominando os valores positivos. Na curva obtida com amostras do furo PSB-07 são observados apenas valores positivos e homogêneos em torno de 2 ‰<sub>VPDB</sub> (mediana). Os valores estão associados às fácies carbonáticas retrabalhadas e com menor contribuição argilosa (*Dim* e *Bim*) (Figura 4.7).

Já na curva obtida a partir de amostras do testemunho PSB-08, ainda predominam os valores positivos, porém com tendência de valores negativos em direção à base (Figura 4.7). Nesse testemunho, os valores mais negativos estão associados à fácies *Dle*, enquanto os positivos, assim como visto no PSB-07, estão relacionados às fácies *Dim* e *Bim*.

A curva de  $\delta^{18}\text{O}$  varia de -11,07 a -1,63, com média em -5,71 ‰<sub>VPDB</sub>. No furo PSB-07 ocorrem apenas valores pouco negativos e baixa dispersão. No PSB-08, os dados são bem variáveis, com valores indo de muito negativos a positivos. A grande variação observada nos resultados  $\delta^{18}\text{O}$  no topo da Formação Morro do Calcário no PSB-08 (Figura 4.7) pode ser resultado, em grande parte, da alteração hidrotermal presente. Foram reconhecidas amostras alteradas (potencialmente) nesse intervalo, classificadas como carbonatos hidrotermais (Figura 4.6), que ainda conta com mineralizações de esfalerita (ZnS) e galena (PbS). A assinatura isotópica do oxigênio em carbonatos é extremamente sensível a alterações decorrentes da percolação de fluidos.

De acordo com o teste de médias de Tukey (Tabela 4.5) a um nível de significância de 5%, podemos concluir que os resultados obtidos em amostras da Formação Morro do Calcário ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) diferem estatisticamente das formações Serra da Lapa e Serra do Landim, e não diferem dos clastos dolomíticos dos diamictitos.

Tabela 4.5: Composição isotópica média das unidades, acompanhada dos valores mínimos e máximos, apresentadas como per mil (‰). Foi aplicado o teste de médias de Tukey, a nível de significância de 5%, para comparação entre as médias.

Unidade	Amostras (n)	$\delta^{13}\text{C}^*$ VPDB	$\delta^{18}\text{O}^*$ VPDB
Fm. Morro do Calcário	95	1,23 (-2,76; 2,52) A	-5,71 (-11,07; -1,63) A
Fm. Serra da Lapa	108	-1,17 (-4,57; 1,73) B	-7,43 (-10,54; -5,27) BC
Fm. Serra do Landim	6	-0,41 (-0,94; 0,09) BC	-8,54 (-10,32; -6,86) B
Clastos dolomíticos	5	0,98 (-0,84; 1,92) AC	-5,64 (-6,44; -4,62) AC

\* médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si segundo o teste de médias de Tukey a nível de 5% de significância.

Para a composição da curva isotópica da Formação Serra da Lapa foram individualizados os resultados ( $n = 5$ ) obtidos em clastos dolomíticos dos diamictitos da base (Tabela 4.5). Portanto foram utilizadas apenas amostras da *AF04*, uma vez que a *AF03* é predominantemente siliciclástica (exceto os próprios clastos do diamictito) e não foi amostrada. A curva de  $\delta^{13}\text{C}$  da Formação Serra da Lapa possui valores entre -4,57 e 1,73 ‰<sub>VPDB</sub>, com média em -1,17 ‰<sub>VPDB</sub> (Tabela 4.5). A média, bem como os valores mínimos e máximos, é bem inferior à observada para a Formação Morro do Calcário.

Destacam-se os valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  na base da *AF04* seguida por tendência positiva para o topo (Figura 4.7). Os valores negativos evidenciam importante quebra da tendência dos valores dos dolomitos abaixo, e é coincidente com os carbonatos sotopostos ao diamictito argilo-carbonoso com fragmentos dolomíticos (Sotero *et al.*, 2019). Azmy *et al.* (2006) sugerem que essa fácies pode representar registro de sedimentação glacio-marinha, e a *AF04* poderia ser caracterizada como carbonato de capa. Porém, Sotero *et al.* (2019) não observaram evidências faciológicas conclusivas que caracterizem a deposição associada a eventos glaciais.

São comuns incursões negativas em perfis de  $\delta^{13}\text{C}$  em unidades neoproterozoicas (Kaufman & Knoll, 1995; Haverson *et al.*, 2010) associadas a carbonatos de capa depositados como seqüências pós-glaciais. No Brasil, seqüências carbonáticas pós-glaciais são amplamente descritas como associadas aos eventos Marinoano (~640 Ma) e Sturtiano (~730 Ma) (*e.g.* Santos *et al.*, 2000; 2004; Alvarenga *et al.*, 2004; Misi *et al.*, 2007; Vieira *et al.*, 2007; Caxito *et al.*, 2012; 2018).

A curva de  $\delta^{18}\text{O}$  da Formação Serra da Lapa varia de -10,54 a -5,27, com média em -7,43 ‰<sub>VPDB</sub>. Observa-se a tendência positiva para o topo (leve no PSB-07 e mais acentuada no PSB-08), até o contato com a Formação Serra do Landim (Figura 4.7). Essa tendência pode mostrar o aumento gradual da temperatura da Terra no tempo da deposição.

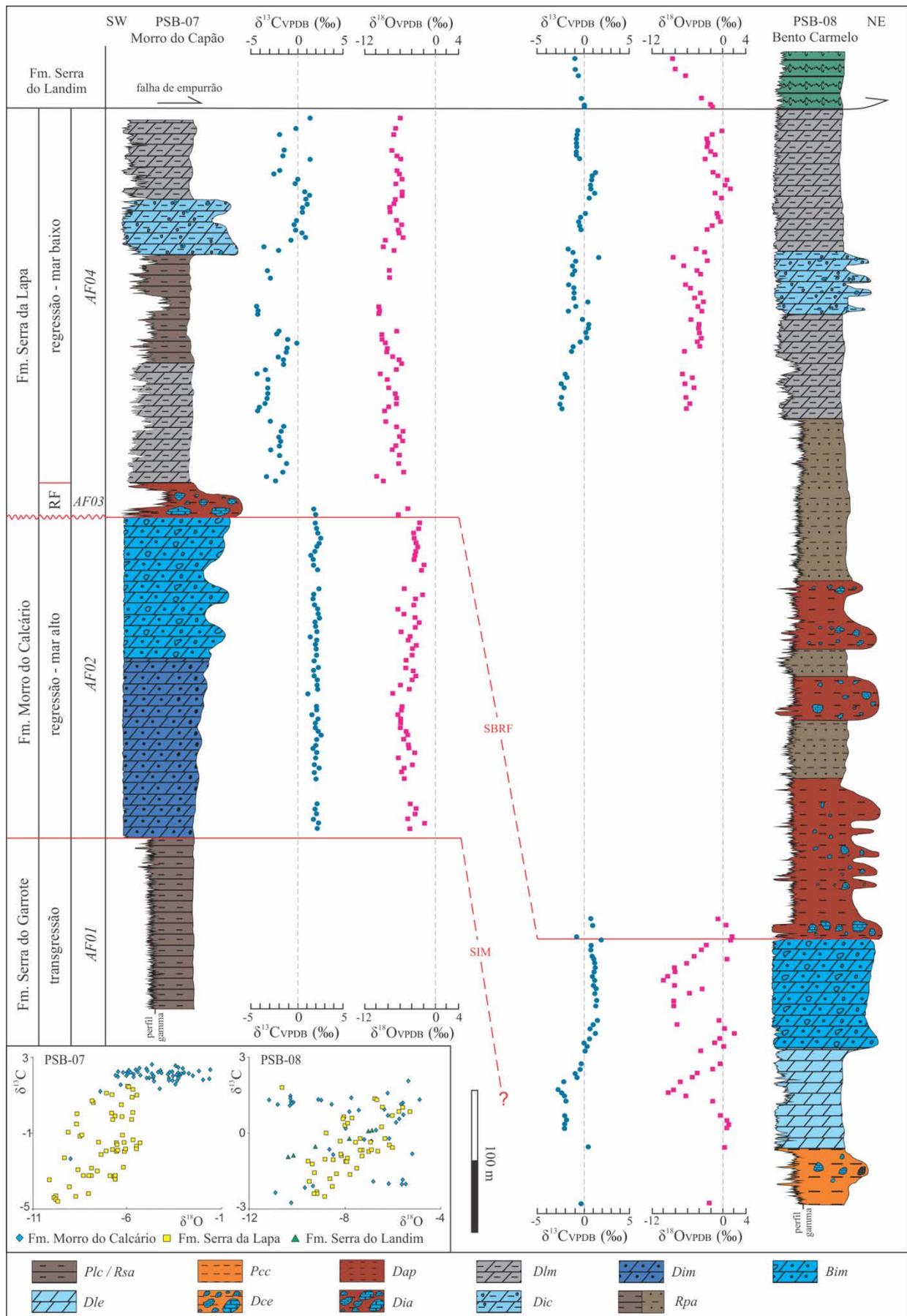


Figura 4.7: Seção quimioestratigráfica isotópica de dois testemunhos de sondagem (PSB-07 e PSB-08). RF: Regressão forçada; SBRF: Superfície basal de regressão forçada; SIM: Superfície de inundação máxima.

A curva para a Formação Serra do Landim mostra valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -0,94 e 0,09, com média em -0,41 ‰<sub>VPDB</sub>. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam de -10,32 e -6,86, com média em -8,54 ‰<sub>VPDB</sub>. Essa unidade possui o valor médio de  $\delta^{18}\text{O}$  mais negativo analisado. Os resultados obtidos em rochas da Formação Serra do Landim não diferem significativamente dos da Formação Serra da Lapa, segundo o teste das médias (Tabela 4.5).

As análises dos clastos dolomíticos mostraram valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -0,84 e 1,92, com média em 0,98 ‰<sub>VPDB</sub>. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam de -6,44 e -4,62, com média em -5,64 ‰<sub>VPDB</sub>.

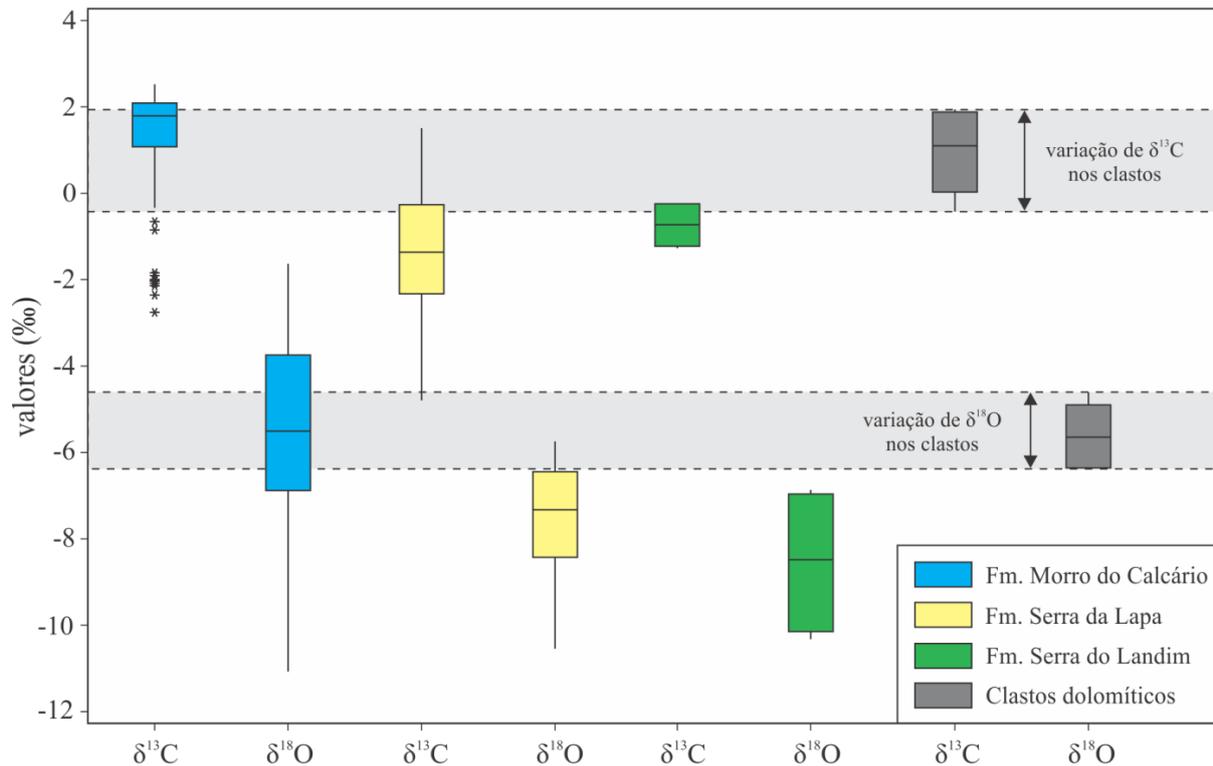


Figura 4.8: Distribuição dos resultados de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  e  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$  (representados em gráficos tipo *boxplot*) obtidos nas formações Morro do Calcário, Serra da Lapa e Serra do Landim, e nos clastos dolomíticos dos diamictitos.

Os resultados obtidos nos clastos dolomíticos são bem semelhantes aos obtidos nos carbonatos da Formação Morro do Calcário, e relativamente distintos aos da Formação Serra da Lapa (Tabela 4.5). Porém, para o oxigênio, a Formação Serra da Lapa também não diferiu estatisticamente dos clastos.

Com base na análise das médias e no estudo qualitativo das amostras e resultados (Tabela 4.5 e Figura 4.8), conclui-se que os clastos são semelhantes aos dolomitos da Formação Morro do Calcário. Assim, a Formação Morro do Calcário possivelmente serviu como área fonte para os diamictitos. Esses dados corroboram com a análise de fácies de Sotero *et al.* (2019), que descrevem os fragmentos da fácies *Dia*, como depositados por fluxo de detritos provindos da AF02.

#### 4.5.3 – Correlação quimioestratigráfica

O uso de curvas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$  em sucessões carbonáticas para correlações interbaciais é aplicável em escalas locais e regionais, desde que a assinatura primária não tenha sido distorcida. Além disso, deve-se garantir que as unidades estudadas tenham sido depositadas em bacias conectadas, onde foi possível a homogeneização isotópica (Halverson *et al.*, 2005). Porém, Frimmel (2010) indicou que variações de  $\delta^{13}\text{C}$  também podem ser controladas por fácies locais e não representativas de mudanças químicas no oceano. A utilização da curva isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  para correlações regionais é mais complicada, uma vez que os valores são extremamente sensíveis a alterações decorrentes da percolação de fluidos. Neste trabalho tentou-se realizar a correlação com outras sucessões do Grupo Vazante através de perfis quimioestratigráficos de  $\delta^{13}\text{C}$  (Figura 4.9).

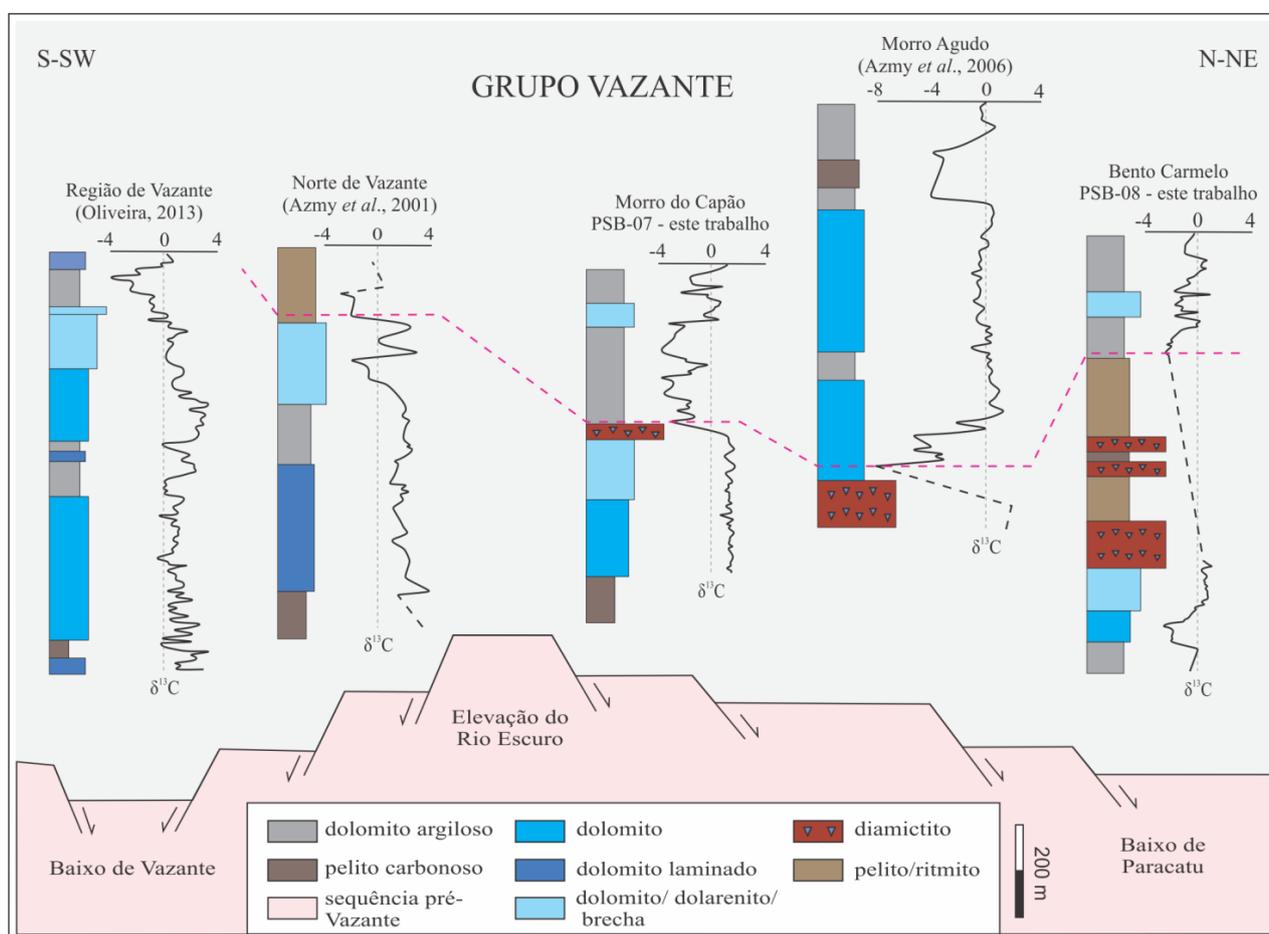


Figura 4.9: Curvas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{‰}_{\text{VPDB}}$ ) obtidas no Grupo Vazante. A interpretação da estruturação da sequência pré-Vazante foi baseada em modelagem do embasamento magnético (Dias *et al.*, 2018). Figura fora de escala no eixo horizontal.

Resultados anteriores de  $\delta^{13}\text{C}$  em carbonatos do Grupo Vazante na região da Mina de Vazante mostraram valores variando de -4,12 a 3,35  $\text{‰}_{\text{VPDB}}$  (Oliveira, 2013). A curva isotópica montada por esse autor contempla as formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário (base). O perfil é marcado por valores predominantemente positivos na maior parte da sequência, com relevante

tendência negativa em direção ao topo, que se inicia na Formação Serra do Poço Verde e é acentuada na base Formação Morro do Calcário. Após o pico negativo máximo (-4,12 ‰) os valores retornam rapidamente ao campo positivo. Padrão semelhante foi observado por Azmy *et al.* (2001) em perfil composto por quatro testemunhos, predominantemente na região norte da cidade de Vazante. A curva montada possui valores que variam de -2,3 a 3,9 ‰<sub>VPDB</sub>. Ocorre ainda o predomínio de valores positivos com tendência negativa para o topo com posterior retorno ao campo positivo. Em direção ao topo ocorre outra relevante incursão negativa (~-2 ‰) que marca o contato com a Formação Serra da Lapa. A correlação isotópica entre esses os dois perfis é satisfeita, mesmo com as diferenças faciológicas.

Em direção a norte, em Morro Agudo, Azmy *et al.* (2006) analisaram apenas rochas da Formação Serra da Lapa. Foi observado valor muito negativo acima da fácies *Dia* (~-8 ‰), seguido de tendência positiva, que estabiliza com valores próximos de zero. No topo do perfil ocorre outra incursão negativa, quando as litologias se tornam mais argilosas, que também retorna para valores próximos de zero.

Os dois perfis analisados neste trabalho (PSB-07 e PSB-08) mostram padrões relativamente semelhantes entre si (Figura 4.7), e com o perfil da região de Morro Agudo. O testemunho PSB-08 mostra um padrão no topo da Formação Morro do Calcário também semelhante ao vistos na região sul, marcado por incursão negativa na base. Isso não foi visto no testemunho PSB-07.

A maior dificuldade ocorre na correlação entre as sequências norte e sul do Grupo Vazante, separadas pela elevação do Rio Escuro (Figura 4.9). Ocorrem notáveis diferenças faciológicas entre as unidades (Oliveira, 1998). Nos principais pacotes carbonáticos das suas regiões (Serra do Poço Verde e Morro do Calcário no sul, e apenas Morro do Calcário no norte), os padrões são relativamente semelhantes, com o predomínio de valores positivos entorno de 2 ‰. Porém na região sul ocorre importante incursão negativa no topo da sequência, vista no norte apenas no PSB-08.

A correlação da Formação Serra da Lapa é dificultada pela escassez de dados na região sul. Porém, o melhor marcador quimioestratigráfico presente na sequência, é a forte incursão negativa na base da Formação Serra da Lapa (linha rosa tracejada – Figura 4.9), que é seguida de tendência positiva. Está presente em todas as regiões analisadas e baliza a correlação regional do Grupo Vazante.

Os padrões das curvas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$ , e a viável correlação entre os perfis, mostra que as porções do Grupo Vazante foram depositadas em uma mesma bacia ou em bacias com alguma conexão, onde foi possível a homogeneização isotópica. O desenvolvimento das bacias ou sub-bacias deve ter sido controlado pelos baixos de Vazante e Morro Agudo, separado parcialmente pela Elevação do Rio Escuro.

## 4.6 – Conclusões

A maioria dos carbonatos analisados do Grupo Vazante pode ser classificada como dolomito pouco alterado por dolomitização e hidrotermalismo, com algumas amostras mais adulteradas. As amostras da Formação Serra do Landim apresentam menor grau de preservação, juntamente com pequeno grupo de dolomitos coletados em intervalo mineralizado (região da ocorrência de Bento Carmelo). Nessas amostras, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  indicam alterações decorrentes da percolação de fluidos.

As flutuações de valores de  $\delta^{13}\text{C}$  nas sucessões carbonáticas do Grupo Vazante podem ser interpretadas como (i) sinais de variações temporais da química no oceano; (ii) alteração isotópica por interação com águas meteóricas, dolomitização ou alteração hidrotermal; (iii) composição de matéria orgânica das fácies. Todas as possibilidades devem ser consideradas em um estudo quimioestratigráfico, porém a partir da análise de alteração, da composição do perfil quimioestratigráfico e da correlação regional, conclui-se que as razões isotópicas refletem os valores primários (ou pouco modificados), e permitem avaliar as mudanças das condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia de sedimentação na época da deposição.

Os clastos dolomíticos que compõem a fácies *Dia* possuem assinatura isotópica muito semelhante à da *AF02* (Formação Morro do Calcário), sugerindo que essa unidade pode ter servido como área fonte para os diamictitos. A hipótese de que a fácies *Dia* pode representar registro de sedimentação glacio-marinha (Azmy *et al.*, 2006; 2008), ou ao menos um retrabalhamento por fluxo de detritos das fácies plataformais devido ao rebaixamento do nível do mar durante um período glacial, e a *AF04* como carbonato de capa, deve ser considerada. A notável incursão negativa de  $\delta^{13}\text{C}$  nos carbonatos acima dos diamictitos ajuda a respaldar essa teoria.

Os resultados isotópicos obtidos em amostras do Grupo Vazante são coerentes com valores de carbonatos proterozoicos e as curvas isotópicas são passíveis de correlação com outras regiões do Grupo Vazante. Por final, infere-se que as porções do Grupo Vazante Norte e Sul foram depositadas em uma mesma bacia, ou em bacias com alguma conexão, onde foi possível a homogeneização isotópica. As bacias ou sub-bacias possivelmente eram separadas (em parte) pela elevação do Rio Escuro.

## 5. DISCUSSÕES

### 5.1 – Fácies sedimentares e ambientes deposicionais do Grupo Vazante

As fácies descritas indicam que a deposição do Grupo Vazante ocorreu em ambiente de margem passiva marinha mista carbonática-siliciclástica (ver Capítulo 3). A associação basal (AF01) é composta por pelitos e ritmitos silto-arenosos carbonosos, representando sedimentação em plataforma marinha profunda de baixa declividade, em regime de transgressão marinha (Figura 3.9; Figura 5.2).

Litoestratigrafia	Estruturas	Regime de sistemas	Associação de fácies	Fácies	Descrição das fácies	Processos e ambiente de sedimentação
Grupo Vazante	Fm. Serra da Lapa	Regressão-mar baixo	AF04	<i>Dic</i>	dolomito intraclástico e dolarenito médio a conglomerático, maciços e mal selecionados.	retrabalhamento por tração e fluxo de detritos de carbonatos. Plataforma carbonática.
				<i>Dlm</i>	dololuto impuro laminado a maciço. Laminações plano-paralelas.	decantação e tração em plataforma carbonática.
				<i>Rpa</i>	ritmito pelito-carbonato-arenito. Laminação plano-paralela e estratificação cruzada.	margem de talude afetada por corrente de turbidez.
				<i>Dap</i>	dolomito argiloso com laminação plano-paralela.	decantação em margem talude.
	Fm. Morro do Calcário	Regressão-mar alto	AF02	<i>Dia</i>	diamictito com fragmentos dolomíticos da AF02.	fluxo de detritos em margem talude.
				<i>Bim</i>	brecha dolomítica e dolarenítica, intraclásticas com fragmentos moderadamente a mal selecionados, angulosos a subarredondados.	retrabalhamento por tração e fluxo de detritos carbonáticos próximo ao recife.
				<i>Dim</i>	dolarenito intraclástico médio a grosso, com oólitos pisólitos. Pouca ou nenhuma matriz.	retrabalhamento por tração de carbonato em zona próxima ao recife.
				<i>Pcc</i>	pelito carbonático com matéria orgânica. Laminação plano-paralela.	decantação em ambiente calmo, protegido pelos recifes.
				<i>Dce</i>	diamictito com fragmentos de dolomito e dolomito estromatolítico.	sedimentação em local protegido pelos recifes com frequentes eventos de fluxo de detritos (queda de blocos).
				<i>Dle</i>	dolomito laminado com estromatólitos colunares e bio-laminações. Falhas sin-sedimentares.	recife com intensa atividade biológica.
Fm. Serra do Garrote	Transgressão	AF01	<i>Plc</i>	pelito negro carbonoso com laminação plano-paralela.	decantação em ambiente marinho profundo. Condição redutora.	
			<i>Rsa</i>	ritmito silto-arenoso com matéria orgânica. Laminação plano-paralela, as vezes ondulada.	alternância de processos de decantação e tração. Mar profundo afetado por correntes de turbidez.	

Litologias				Estruturas sedimentares			
	dolomito/dolarenito		dolomito/dolarenito/brecha		bio-laminações		falha sin-sedimentar
	dolomito argiloso		dolomito laminado		estratificação cruzada		fragmento estromatolítico
	arenito		ritmito silto-arenoso		colunas de estromatólitos		
	pelito carbonático carbonoso		pelito carbonoso		laminação plano-paralela		

Figura 5.1: Coluna estratigráfica esquemática da região de Morro Agudo.

Após a inundação máxima, em trato de mar alto, iniciou-se a deposição da AF02 em ambiente de recife com barreiras em borda de plataforma, composta por dolomitos laminados com estromatólitos, brechas dolomíticas e dolareníticas, dolarenitos e ainda pelitos carbonáticos

carbonosos com fácies diamictito. O contato entre as *AF01* e *AF02* é interpretado como realizado por superfície de inundação máxima (SIM).

O abaixamento do nível relativo do mar gerou uma regressão forçada e a deposição da *AF03* em trato de sistema do estágio de queda. É composta, na base, por diamictito argilo-carbonoso, passando a pelito e ritmito silto-arenoso, depositados em região de margem de talude. A base da *AF03* é marcada por superfície basal de regressão forçada (SBRF).

A retomada da subida do nível relativo do mar proporcionou a deposição da *AF04* e ainda da continuação da *AF03* em posição mais distal. A *AF04* é composta por dololutitos argilosos laminados e maciços, e dolarenitos intraclásticos depositados em plataforma marinha carbonática.

O padrão de empilhamento observado sugere que a deposição de todas as unidades ocorreu progressivamente, em processo de subida do nível relativo do mar (tratos transgressivos e mar alto), de queda (regressão forçada) e da retomada da subida (mar baixo). As unidades descritas variam lateralmente de espessura, proporção e composição, dependendo da sua posição geográfica (principalmente na direção Norte-Sul), indicando que o paleorelevo da bacia atuou de maneira importante na deposição das fácies.

## 5.2 – Estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio

As amostras de carbonato utilizadas nesse trabalho foram avaliadas quanto ao grau de preservação da assinatura isotópica primária. Apesar da pervasiva dolomitização dos carbonatos do Grupo Vazante ( $Mg/Ca > 0,5$ ) e hidrotermalismo frequente, a maioria das amostras pôde ser classificada como dolomito pouco alterado por dolomitização e hidrotermalismo. As amostras da Formação Serra do Landim apresentam menor grau de preservação, juntamente com pequeno grupo de dolomitos coletados em intervalo mineralizado. Nessas rochas, os valores de  $\delta^{18}O$  indicam alterações decorrentes da percolação de fluidos. Com base na discussão sobre diagênese e alteração hidrotermal, admite-se que as amostras estudadas estão relativamente bem preservadas e as razões isotópicas de C e O refletem os valores quase originais e os resultados são adequados para o uso em estudos quimioestratigráficos. A seção quimioestratigráfica da região de Morro Agudo montada através de análises em dois testemunhos de sondagem é apresentada na Figura 5.2.

A curva isotópica observada para a Formação Morro do Calcário possui valores de  $\delta^{13}C$  entre -2,76 e 2,52 ‰<sub>VPDB</sub>, com média em 1,23 ‰<sub>VPDB</sub>. Predominam os valores positivos em torno 2 ‰<sub>VPDB</sub> (mediana), com apenas uma incursão negativa na base do furo PSB-08.

A curva de  $\delta^{18}O$  varia de -11,07 a -1,63, com média em -5,71 ‰<sub>VPDB</sub>. Foram reconhecidas oito amostras alteradas, classificadas como carbonatos hidrotermais, presentes em intervalo estratigráfico que conta com mineralizações de esfalerita (ZnS) e galena (PbS).

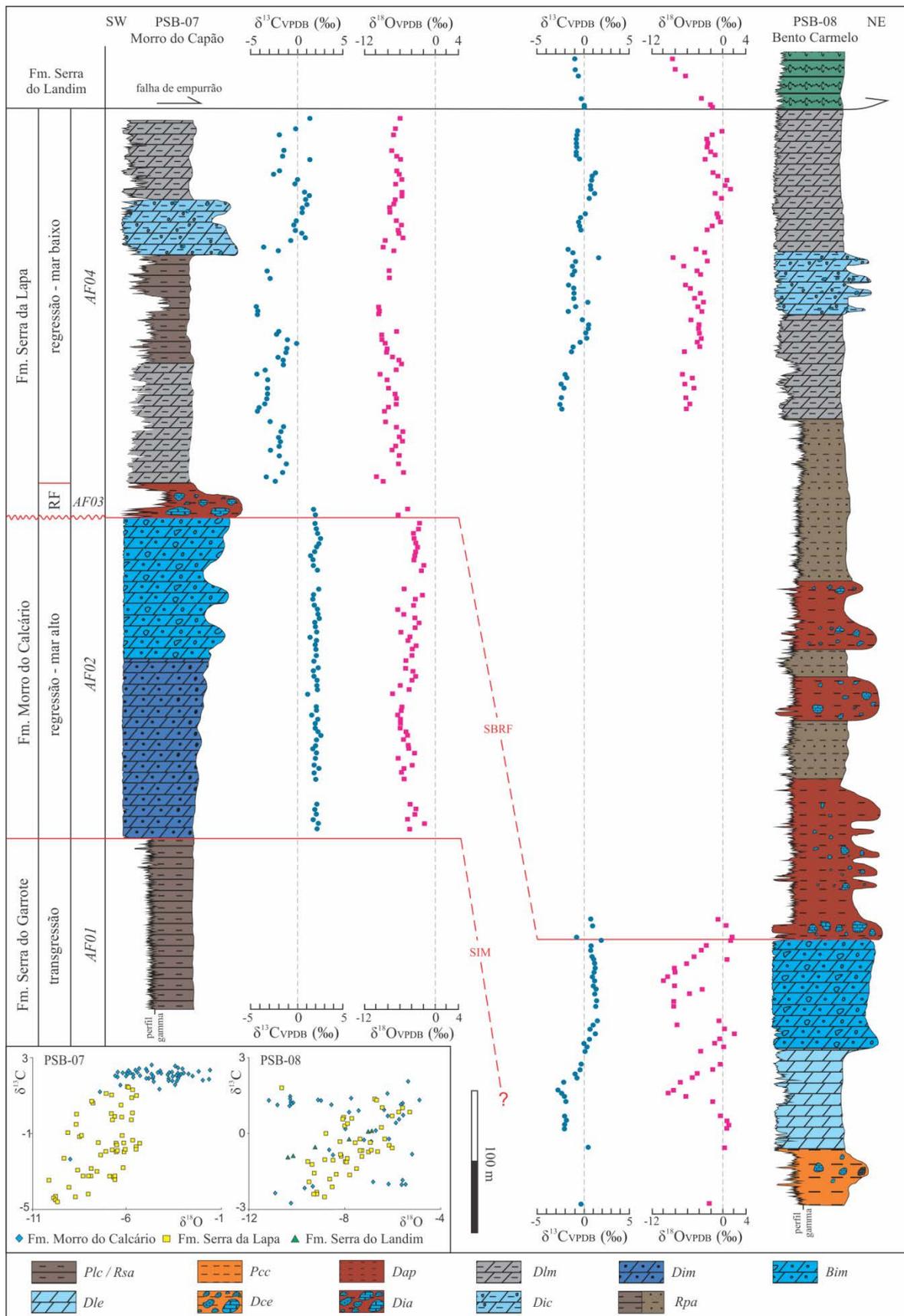


Figura 5.2: Seção quimioestratigráfica isotópica de dois testemunhos de sondagem (PSB-07 e PSB-08) na região de Morro Agudo.

De acordo com o teste de médias de Tukey a um nível de significância de 5%, podemos concluir que os resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  obtidos em amostras da Formação Morro do Calcário

diferem estatisticamente das formações Serra da Lapa e Serra do Landim, e não diferem dos clastos dolomíticos dos diamictitos.

A curva de  $\delta^{13}\text{C}$  da Formação Serra da Lapa possui valores entre -4,57 e 1,73 ‰<sub>VPDB</sub>, com média em -1,17 ‰<sub>VPDB</sub>. A média, bem como os valores mínimos e máximos, é bem inferior à observada para a Formação Morro do Calcário. Destacam-se os valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  na base da *AF04* seguida por tendência positiva para o topo. Os valores negativos evidenciam importante quebra da tendência dos valores dos dolomitos abaixo, e é coincidente com os carbonatos sotopostos ao diamictito argilo-carbonoso com fragmentos dolomíticos (Sotero *et al.*, 2019). Essa fácies (*Dia*) pode representar registro de sedimentação glacio-marinha. A importante excursão isotópica negativa de  $\delta^{13}\text{C}$  nos carbonatos logo acima dos diamictitos sugere que essa *AF* pode se tratar de uma unidade de carbonato de capa.

São comuns excursões negativas em perfis de  $\delta^{13}\text{C}$  em unidades neoproterozoicas (Kaufman & Knoll, 1995; Haverson *et al.*, 2010) associadas a carbonatos de capa depositados como sequências pós-glaciais. No Brasil, sequências carbonáticas pós-glaciais são amplamente descritas como associadas aos eventos Marinoano (~640 Ma) e Sturtiano (~730 Ma) (*e.g.* Santos *et al.*, 2000; 2004; Alvarenga *et al.*, 2004; Misi *et al.*, 2007; Vieira *et al.*, 2007; Caxito *et al.*, 2012; 2018).

A curva de  $\delta^{18}\text{O}$  da Formação Serra da Lapa varia de -10,54 a -5,27, com média em -7,43 ‰<sub>VPDB</sub>. Observa-se a leve tendência positiva para o topo, que pode representar o aumento gradual da temperatura da Terra no tempo da deposição.

As análises dos clastos dolomíticos que compõem a fácies *Dia* mostraram valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -0,84 e 1,92, com média em 0,98 ‰<sub>VPDB</sub>. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam de -6,44 e -4,62, com média em -5,64 ‰<sub>VPDB</sub>. A assinatura isotópica é semelhante à da *AF02* (Formação Morro do Calcário) e pouco distinta da *AF04* (Formação Serra da Lapa), sugerindo que a primeira pode ter servido como área fonte para os diamictitos. A hipótese de que a fácies *Dia* pode representar registro de sedimentação glacio-marinha (Azmy *et al.*, 2006; 2008), ou ao menos um retrabalhamento por fluxo de detritos das fácies plataformais devido ao rebaixamento do nível do mar durante um período glacial, e a *AF04* como carbonato de capa, deve ser considerada.

### 5.3 – Correlação estratigráfica regional

As seis seções estudadas na região de Morro Agudo são correlacionáveis entre si através das fácies levantadas (Figura 5.3). A *AF01* ocorre apenas no furo PSB-07, na base da sequência interceptada pelos furos. Por não ser interceptado pelos outros furos, o contato com a *AF02* é inferido em profundidade para as outras regiões. Em campo essa *AF* é estendida por grande faixa geográfica, tanto para nordeste como sudeste da área. É contínua e relativamente monótona, com

alternância das fácies *Plc* e *Rsa* no decorrer da sua faixa de ocorrência, com a tendência do enriquecimento de *Plc* para o topo.

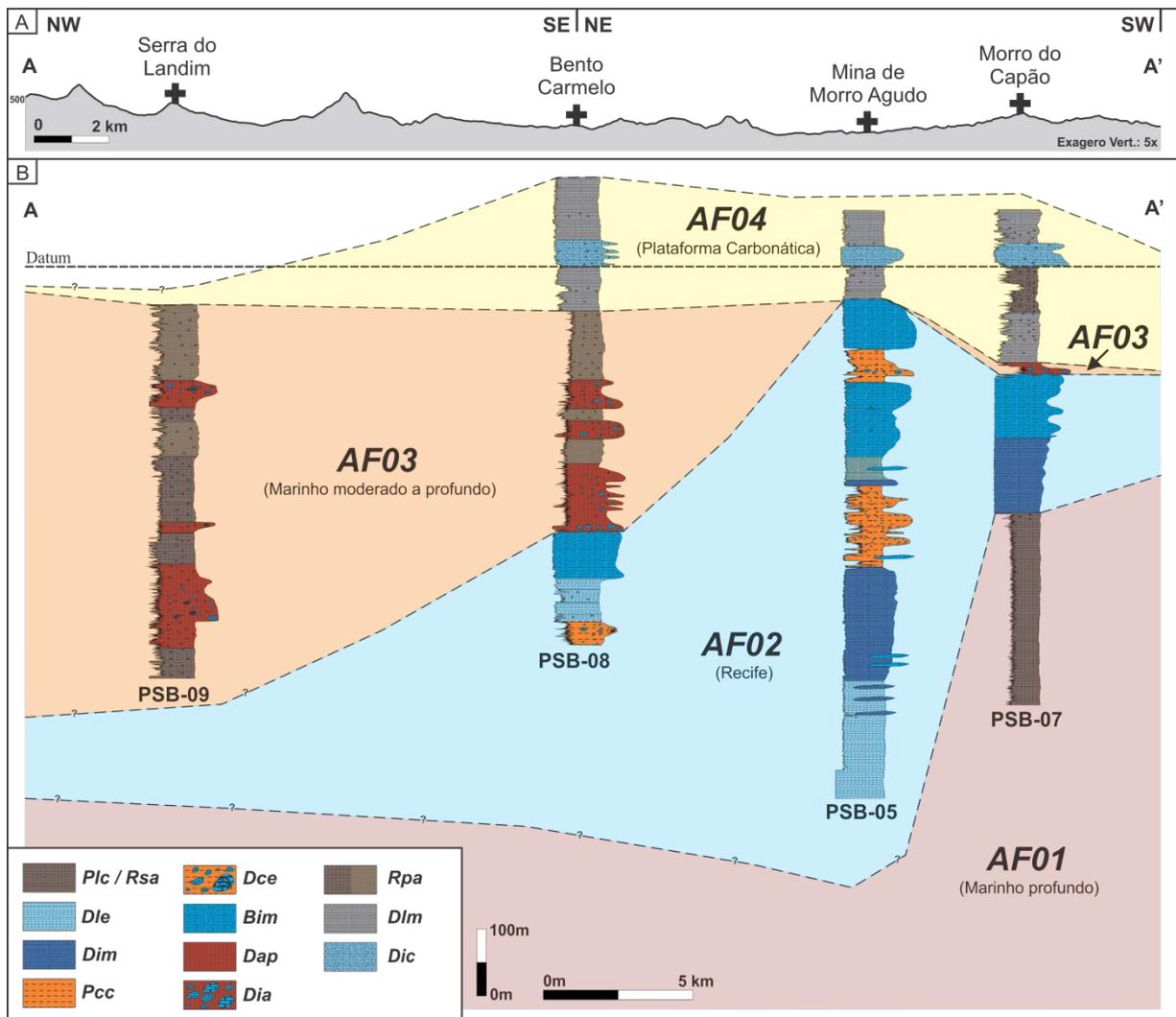


Figura 5.3: Seção estratigráfica do Grupo Vazante na região de Morro Agudo (aproximadamente Norte-Sul).

A *AF02* foi obtida em cinco seções. A espessura da *AF* afina em direção sul e tem sua maior espessura observada na região da mina de Morro Agudo. O grande espessamento nessa região pode estar associado a falhas sin-sedimentares. Dentro dessa *AF*, as fácies *Dim* e *Bim* são contínuas nos topos de todas as seções. As fácies com relevante contribuição argilosa (*Pcc* e *Dce*) não foram observadas na região sul, no Morro do Capão, mas se tornam comuns em direção a norte, com maior espessura observada no furo PSB-05. A fácies *Dle* é bem descrita na base da *AF*, principalmente nos furos PSB-05 e PSB-11, com espessa sequência de dolomito estromatolítico e laminado.

A *AF03* mostra tendência de afinamento para S-SW. Em Morro Agudo não foi observado essa *AF*, com dois possíveis motivos: não deposição, ou a deformação observada nesse contato alterou o empilhamento original. Há tendência do espessamento para norte. Além disso, em direção a norte há o predomínio da fácies *Rpa* sobre as outras.

A AF04 predomina na região a sul, afinando em direção a N-NW. As três seções que a interceptam, possuem todas as fácies descritas, com o predomínio de *Dlm*, e camada bem marcada de *Dic* que pode ser correlacionada entre os furos.

A arquitetura das AFs mostra tendência de predomínio de fácies proximais em direção a sul, enquanto das mais profundas em direção a norte. A correlação faciológica local das sucessões é facilitada pela proximidade dos perfis levantados. Porém, para correlações regionais essa tarefa se torna complexa e necessita de aplicação de outras ferramentas, como de marcadores isotópicos nas seções estratigráficas.

O uso de curvas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$  de sucessões carbonáticas para correlações regionais é aplicável em escalas locais e regionais, desde que a assinatura primária não tenha sido distorcida e que haja garantia que as unidades tenham sido depositadas em bacias conectadas, onde foi possível a homogeneização isotópica (Halverson *et al.*, 2005). A utilização da curva isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  para correlações regionais é mais complicada, uma vez que os valores são extremamente sensíveis a alterações decorrentes da percolação de fluidos. Neste trabalho, a correlação com outras sucessões do Grupo Vazante é efetuada através de perfis de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  (Figura 5.4).

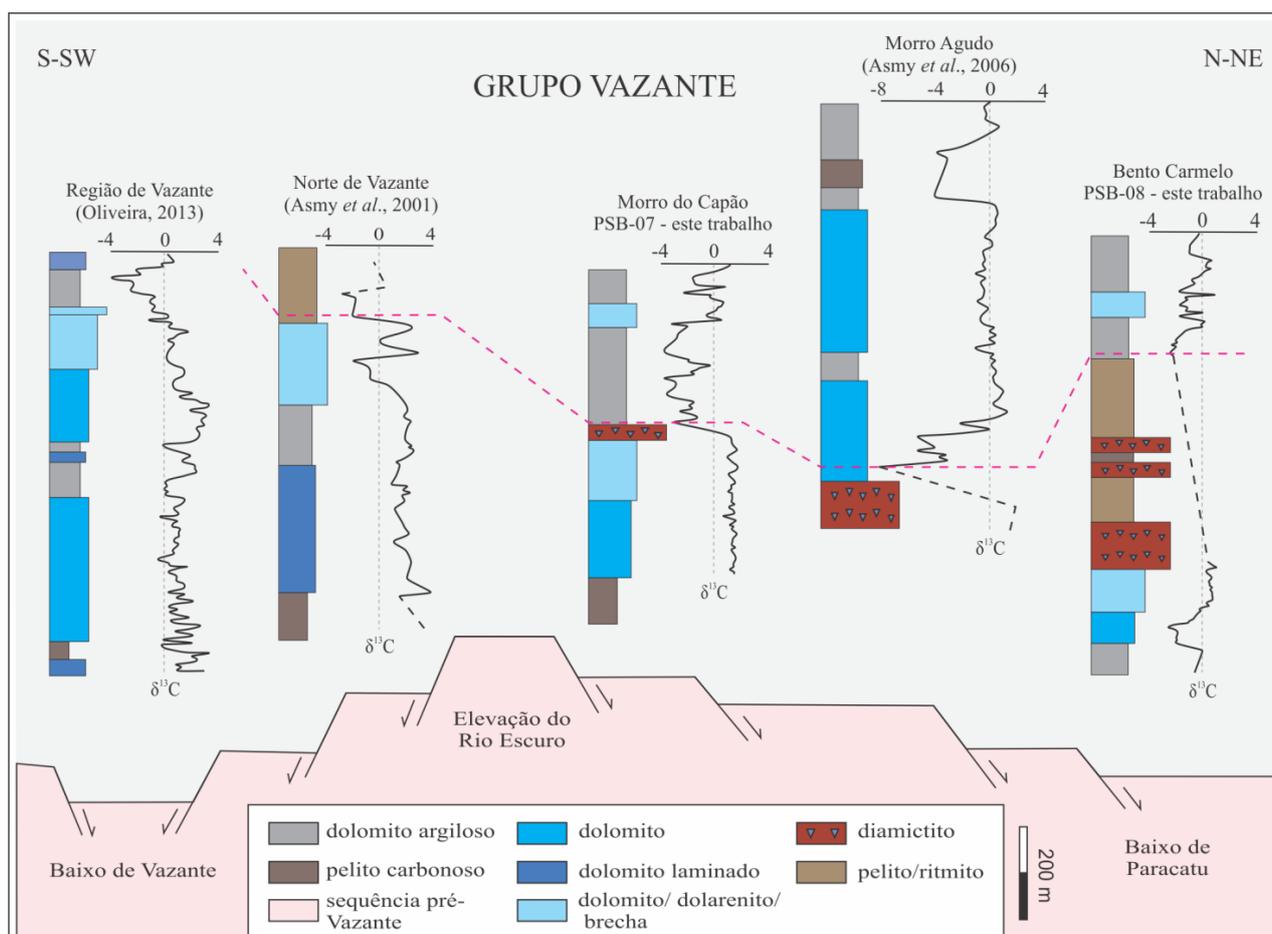


Figura 5.4: Curvas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  obtidas no Grupo Vazante.

A curva isotópica obtida na região de Vazante é marcada por valores predominantemente positivos na maior parte da sequência, com relevante tendência negativa em direção ao topo, que se inicia na Formação Serra do Poço Verde e é acentuada na base Formação Morro do Calcário. Após o pico negativo máximo (-4,12 ‰) os valores retornam rapidamente ao campo positivo. Padrão semelhante foi observado por Azmy *et al.* (2001), que montou perfil composto por quatro testemunhos predominantemente na região norte de Vazante. Ocorre ainda o predomínio de valores positivos com tendência negativa para o topo com posterior retorno ao campo positivo. Em direção ao topo ocorre relevante incursão negativa (~-2 ‰) que marca o contato com a Formação Serra da Lapa. A correlação isotópica entre esses os dois perfis é satisfeita, apesar das diferenças faciológicas.

Em direção a norte, em Morro Agudo, Azmy *et al.* (2006) analisaram apenas rochas da Formação Serra da Lapa. Foi observado valor muito negativo acima da fácies *Dia* (~-8 ‰), seguido de tendência positiva, que estabiliza com valores próximos de zero. No topo do perfil ocorre outra incursão negativa.

Os dois perfis analisados neste trabalho (PSB-07 e PSB-08) mostram padrões relativamente semelhantes entre si, e com o perfil da região de Morro Agudo. As fácies e *AFs* também ajudam na correlação (Figura 5.3).

A maior dificuldade aparece na correlação entre as sequências Norte e Sul do Grupo Vazante, separadas pela elevação do Rio Escuro. É sabida a notável diferença estratigráfica entre as regiões (Oliveira, 1998). Nos principais pacotes carbonáticos das suas regiões (Serra do Poço Verde e Morro do Calcário no sul, e apenas Morro do Calcário no norte), os padrões são relativamente semelhantes, com o predomínio de valores positivos entorno de 2 ‰. Porém na região sul ocorre importante incursão negativa no topo da sequência. Incursão semelhante é observada apenas no furo PSB-08 na região norte.

A correlação da Formação Serra da Lapa é dificultada pela escassez de dados na região sul. Porém, o melhor marcador quimioestratigráfico presente na sequência, é a forte incursão negativa na base da unidade, que é seguida de tendência positiva. Está presente em todas as regiões analisadas e baliza a correlação regional do Grupo Vazante.

Os padrões das curvas isotópicas de  $\delta^{13}\text{C}$ , e a viável correlação entre os perfis, mostra que as porções do Grupo Vazante foram depositadas em uma mesma bacia ou em bacias com alguma conexão, onde foi possível a homogeneização isotópica. O desenvolvimento das bacias ou sub-bacias deve ter sido controlado pelos baixos de Vazante e Paracatu, separada parcialmente pela Elevação do Rio Escuro.

## 6. CONCLUSÕES GERAIS

A partir das discussões e conclusões levantadas nesse volume, podem-se inferir os seguintes pontos gerais sobre a sedimentologia e estratigrafia do Grupo Vazante.

As fácies levantadas na região de Paracatu indicam que a deposição das unidades ocorreu em ambiente de margem passiva marinha mista, de baixa declividade e com relevante atuação de falhas sin-sedimentares. As *AFs* descritas variam lateralmente de espessura e composição, indicando que o paleorelevo da bacia atuou de maneira determinante na deposição das fácies. Nesse sentido, a inflexão do Rio Escuro pode representar um paleoalto geográfico que influenciou na deposição do Grupo Vazante.

Quanto ao grau de preservação da assinatura isotópica primária dos carbonatos, a maioria das amostras analisadas pode ser classificada como dolomito pouco alterado por dolomitização e hidrotermalismo, com algumas amostras mais adulteradas. As amostras da Formação Serra do Landim apresentam menor grau de preservação, juntamente com pequeno grupo de dolomitos coletados em intervalo estratigráfico mineralizado (região da ocorrência de Bento Carmelo). Nessas rochas, os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  indicam alterações decorrentes da percolação de fluidos.

As flutuações de valores de  $\delta^{13}\text{C}$  nas sucessões carbonáticas do Grupo Vazante podem ter várias interpretações, porém a partir da análise do grau de alteração, da composição do perfil quimioestratigráfico e da correlação regional, conclui-se que as razões isotópicas refletem os valores primários (ou pouco modificados), e permitem avaliar as mudanças das condições químicas e biológicas do paleoambiente da bacia de sedimentação na época da deposição.

A porção estudada do Grupo Vazante representa um ciclo quase completo de subida e descida do nível relativo do nível de base. São descritos registros de trato de sistema transgressivo (*AF01*), trato de mar alto (*AF02*), trato de regressão forçada (*AF03*) e de mar baixo (*AF03* e *AF04*).

Os clastos dolomíticos que compõem a fácies *Dia* possuem assinatura isotópica semelhante à da *AF02* (Formação Morro do Calcário), sugerindo que essa pode ter servido como área fonte para os diamictitos. A fácies *Dia* pode representar registro de sedimentação glacio-marinha (Azmy *et al.*, 2006; 2008), ou ao menos um retrabalhamento por fluxo de detritos das fácies plataformais devido ao rebaixamento do nível do mar durante um período glacial. A notável incursão negativa de  $\delta^{13}\text{C}$  nos carbonatos acima dos diamictitos ajuda a respaldar essa teoria.

O melhor marcador quimioestratigráfico presente na sequência é a forte incursão negativa acima dos diamictitos da Formação Serra da Lapa, que é seguida de tendência positiva. Está presente em todas as regiões analisadas e baliza a correlação regional do Grupo Vazante.

Os resultados isotópicos obtidos em amostras do Grupo Vazante são coerentes com valores de carbonatos proterozoicos e as curvas isotópicas são passíveis de correlação com outras regiões do

Grupo Vazante. Por final, conclui-se que as porções Norte e Sul do Grupo Vazante foram depositadas em uma mesma bacia, ou em bacias com alguma conexão, onde foi possível a homogeneização isotópica. As bacias ou sub-bacias possivelmente eram separadas (em parte) pela elevação do Rio Escuro.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F. & Teixeira, W. (2017). The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: Heibron, M., Cordani, U. G., Alkmim, F. F., (Eds.), *São Francisco Craton, Eastern Brazil, Regional Geology Reviews*. Springer International Publishing Switzerland, pp. 71-94.
- Almeida, F.F.M. (1967). Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, *Boletim*. 241, 36p.
- Almeida, F.F.M. (1968). Evolução Tectônica do Centro-Oeste Brasileiro no Proterozóico Superior. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 40 (Suplemento). p. 285-295.
- Almeida, F.F.M. (1977). O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. (1981). Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth Science Reviews*, 17: 1-29.
- Alvarenga, C.J.S., Santos, R. V., Dantas, E. L. (2004). C–O–Sr isotopic stratigraphy of cap carbonates overlying Marinoan-age glacial diamictites in the Paraguay Belt, Brazil. *Precambrian Research*, 131, 1-21.
- Azmy, K., Veizer, J., Misi, A., Oliveira, T.F. de, Sanches, A.L., Dardenne, M.A. (2001). Dolomitizations an isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brazil, *Precambrian Research*, v 112, p303-329.
- Azmy, K., Kaufman, A. J., Misi, A., Oliveira, T.F. (2006). Isotope stratigraphy of the Lapa Formation, São Francisco Basin, Brazil: Implications for Late Neoproterozoic glacial events in South America. *Precambrian Research*, 149, 231-248.
- Azmy, K., Kendall, B., Creaser, R.A., Heaman, L., Oliveira, T.F. (2008). Global correlation of the Vazante Group, São Francisco Basin, Brazil: Re-Os and U-Pb radiometric age constraints. *Precambrian Research*, 164:160-172.
- Bartley, J.K., Semikhatov, M.A., Kaufman, A.J., Knoll, A.H., Pope, M.C., Jacobsen, S.B. (2001). Global events across the Mesoproterozoic-Neoproterozoic boundary: C and Sr isotopic evidence from Siberia. *Precambrian Research*, 111, 165–202.
- Baia, F.H. (2013). *Bechas Hidrotermais da Mina de Cercado e das Ocorrências de Olho d'água, Mata II e Pamplona: Implicações Metalogenéticas e Prospectivas para o zinco na região de Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 230p.

- Brandalise, L.A., Pimentel, G.B., Steiner, H.P., Soares, J., Mendes, J. R., Queiroz, N.F., Lima, O.M., Pádua, W. (1980). *Projeto sondagens Bambuí em Minas Gerais: relatório final*. Belo Horizonte, DNPM/CPRM, v.1.
- Brand, U. & Veizer, J. (1980). Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system: 1. Trace elements. *Journal of Sedimentary Petrology* 50, 1219–1236.
- Buick, R., Thornett, J.R., McNaughton, N.J., Smith, J.B., Barley, M.E., Savage, M. (1995). Record of emergent continental crust ~3.5 billion years ago in the Pilbara craton of Australia. *Nature* 375, 574-577.
- Campos-Neto, M.C. (1984a). Litoestratigrafia e evolução paleogeográfica dos Grupos Canastra e Paranoá (Região Vazante-Lagamar, MG). *Revista Brasileira de Geociências*, 14(2): 81-91.
- Campos-Neto, M.C. (1984b). Geometria e fases de dobramento brasileiros superpostos no oeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 14(1): 60-68.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of Sequence Stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam, 375 p.
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.L., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C.G.St.C., Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nummedal, D., Pomar, L., Posamentier, H.W., Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel, R.J., Strasser, A., Tucker, M.E., Winker, C. (2009). Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, vol. 92, 1–33.
- Caxito, F.A., Halverson, G.P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T.G., Uhlein, G.J. (2012). Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Res.* 200–203, 38–58.
- Caxito, F.A., Frei, R., Uhlein, G.J., Dias, T.G., Ártig, T.B., Uhlein, A. (2018). Multiproxy geochemical and isotope stratigraphy records of a neoproterozoic oxygenation event in the Ediacaran Sete Lagoas cap carbonate, Bambuí Group, Brazil. *Chem. Geol.* 481, 119–132.
- Cloud, P.E. & Dardenne, M.A. (1973). Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 84:1673-1676.
- Cordeiro, P.F.O., Oliveira, C.G., Paniago, L.N., Romagna, G., Santos, R.V. (2018). The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geology Reviews* 101, 437-452.
- Coplen, T.B., Kendall, C., Hopple, J. (1983). Comparison of stable isotope reference samples. *Nature* 302: 236–238.
- Cunha, I.A., Coelho, C.E.S., Misi, A. (2000). Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb–Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 318– 321.
- Dardenne, M., A. (1972). A mineralização sulfetada de Pb-Zn de Morro Agudo (MG-Brasil). XXVI Congresso Brasileiro de Geologia, Resumos, Boletim 1, p. 55-56. Belém: SBG.

- Dardenne, M.A. & Campos Neto, M.C. (1976). Geologia da região de Lagamar, Minas Gerais. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 29, Anais, p.17. SBG.
- Dardenne, M.A. (1978). Geologia da região de Morro Agudo (MG). *Boletim Núcleo Centro-Oeste*, SBG, 7/8: 68-94.
- Dardenne, M.A., Freitas-Silva F.H., Souza, J.C.F., Campos, J.E.G. (1998). Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. *XXXX Congresso Brasileiro de Geologia*. Resumos, p. 26. Belo Horizonte: SBG.
- Dardenne, M.A. (2000). The Brasilia fold belt. *In: U.G. Cordani, E.G. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (Eds.), Tectonic evolution of South America*, p. 231-263.
- Dardenne, M.A. & Schobbenhaus, C. (2001). *Metalogênese do Brasil*. Editora UnB, Brasília, 392p.
- Derry, L.A., Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B. (1992). Sedimentary cycles and environmental change in the Late Proterozoic: evidence from stable and radiogenic isotopes. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 56, 1317–1329.
- Derry, L.A. (2010). A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram–Wonoka anomaly. *Earth and Planetary Science Letters*, 295, 152–162.
- Dias, P.H.A. & Sotero, M.P. (2017a). *Perfil Composto PSB-05*. Escala 1:2.000. Projeto Paracatu-Unai (ARIM-Áreas de Relevante Interesse Mineral): Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Versão disponível em [www.cprm.gov.br/GeoSBG](http://www.cprm.gov.br/GeoSBG) e RIGEO.
- Dias, P.H.A. & Sotero, M.P. (2017b). *Perfil Composto PSB-08*. Escala 1:2.000. Projeto Paracatu-Unai (ARIM-Áreas de Relevante Interesse Mineral): Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Versão disponível em [www.cprm.gov.br/GeoSBG](http://www.cprm.gov.br/GeoSBG) e RIGEO.
- Dias, P.H.A. & Sotero, M.P. (2017c). *Perfil Composto PSB-07*. Escala 1:2.000. Projeto Paracatu-Unai (ARIM-Áreas de Relevante Interesse Mineral): Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Versão disponível em [www.cprm.gov.br/GeoSBG](http://www.cprm.gov.br/GeoSBG) e RIGEO.
- Dias, P.H.A. & Sotero, M.P. (2017d). *Perfil Composto PSB-09*. Escala 1:2.000. Projeto Paracatu-Unai (ARIM-Áreas de Relevante Interesse Mineral): Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Versão disponível em [www.cprm.gov.br/GeoSBG](http://www.cprm.gov.br/GeoSBG) e RIGEO.
- Dias, P.H.A., Sotero, M.P., Matos, C.A., Marques, E.D., Marinho, M.S., Couto-Júnior, M.A. (2018). *Área de Relevante Interesse Mineral - ARIM: Distrito Mineral de Paracatu-Unai (Zn-Pb-Cu), MG*. Belo Horizonte: CPRM-BH. 140p. Série Províncias Mineraias do Brasil. Programa de Geologia do Brasil - Série Províncias Mineraias do Brasil, nº14. Versão disponível em [www.cprm.gov.br/GeoSBG](http://www.cprm.gov.br/GeoSBG) e RIGEO.
- Drever, J.I. (1988) *The Geochemistry of Natural Waters*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 437 p.

- Feng, L.J., Chu, X.L., Huang, J., Zhang, Q.R., Chang, H.J. (2010). Reconstruction of paleoredox conditions and early sulfur cycling during deposition of the Cryogenian Datangpo Formation in South China. *Gondwana Research*, 18, 632–637.
- Freitas-Silva, F.H. & Dardenne, M.A. (1997). Pb/Pb isotopic patterns of galenas from the Morro do Ouro (Paracatu Formation), Morro Agudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits. *I South American Symposium on Isotope Geology*, Campos do Jordão, Brazil, pp. 118–120.
- Frimmel, H.E. (2009). Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator. *Chemical Geology*, 258, 338–353.
- Frimmel, H.E. (2010). On the reliability of stable carbon isotopes for Neoproterozoic chemostratigraphic correlation. *Precambrian Research*, 182, 239–253.
- Fuck, R.A. (1994). A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica da Província Tocantins. *4º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, Anais, p.184-187, SBG.
- Fuck, R.A., Pimentel, M.M., Soares, J.E.P., Dantas, E.L. (2005). Compartimentação da Faixa Brasília. *9º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, Atas, p. 26-27, SBG.
- Halverson, G.P., Hoffman, P.F., Schrag, D.P., Maloof, A.C., Rice, A.H. (2005). Towards a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *Geol. Soc. Am. Bull.* 117, 1181–1207.
- Halverson, G.P., Maloof, A.C., Schrag, D.P., Dudas, F.O., Hurtgen, M.T. (2007). Stratigraphy and geochemistry of a ca 800 Ma negative carbon isotope interval in northeastern Svalbard. *Chem. Geol.* 237, 5–27.
- Halverson, G.P., Wade, B.P., Hurtgen, M.T., Barovich, K.M. (2010). Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Research*, 182: 337–350.
- Hitzman, M.W., Thorman, C.H., Romagna, G., Oliveira, T. F., Dardenne, M.A., Drew, L.J. (1995). The Morro Agudo Zn–Pb deposit, Minas Gerais, Brazil: a Proterozoic Irish-type carbonate hosted sedex replacement deposit. *Abstracts with Programs-Geological Society of America* 27, A408.
- Hitzman, M.W. (1997). Sediment Hosted Zn-Pb and Au Deposits in the proterozoic Paracatu Vazante Fold Belt Minas Gerais Brazil. *In: GSA, Geological Society of America Abstracts with Programs*, 27, p A408.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., Schrag, D.P. (1998). A neoproterozoic snowball Earth. *Science* 281, 1342–1346.
- Iyer, S.S., Hoefs, J., Krouse, H. (1992). Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from Bambuí Group, Minas Gerais, Brazil – Implication for ore genesis. *Econ. Geol.*, 87:437-443.
- Jacobsen, S. & Kaufman, A. (1999). The Sr, C and O isotopic evolution of the Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161:37-57.

- Jefferés, J.B.D., Shields, G.A., Wallman, K. (2007). The oxygen isotope evolution of seawater. A critical review of a long-standing controversy and an improved geological water cycle model for the past 3.4 billion years. *Earth- Science Review* 83. 83-122p.
- Kaufman, A.J., Hayes, J.M., Knoll, A.H., Germs, G.J.B. (1991). Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effect of diagenesis and metamorphism. *Precambrian Research* 49, 301–327.
- Kaufman, A.J. & Knoll, A.H. (1995). Neoproterozoic variations in the C-isotopic compositional of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73:27-49.
- Knauth, L.P. & Kennedy, M.J. (2009). The late Precambrian greening of the Earth. *Nature*, 460, 728–731.
- Kah, L.C., Sherman, A.G., Narbonne, G.M., Knoll, A.H., Kaufman, A.J. (1999).  $\delta^{13}\text{C}$  stratigraphy of the Proterozoic Bylot Supergroup, Baffin Island Canada; implications for regional lithostratigraphic correlations. *Canadian Journal of Earth Sciences* 36, 313–332.
- Kirschvink, J.L. (1992). Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball earth. In: J.W. Schopf, C. Klein (Eds.) *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, 51–52.
- Knoll, A.H., Hayes, J.M., Kaufman, A.J., Swett, K., Lambert, I.B. (1986). Secular variations in carbon isotope ratios from upper Proterozoic successions of Svalbard and East Greenland. *Nature* 321, 832–837.
- Laranjeira, N.P.F. (1992). *Geologia do Grupo Paranoá na região de Unaí ma plataforma siliciclástica no Proterozóico de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 213 p.
- Madalosso, A. & Valle, C.R. (1978). Considerações sobre a Estratigrafia e Sedimentologia do Grupo Bambuí na Região de Paracatu – Morro Agudo (MG). *XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Anais*, 2: 622-634. Recife: SBG.
- Marques, C.S.S., Ulhein, A., Oliveira, G. D., Ulhein, G.J., Sial, A.N., Alvarenga, C.J.S. (2015). Geologia e Químioestratigrafia Isotópica do Grupo Vazante em Lagamar, MG. *Geonomos*, 23(1), 26-41.
- Matos, D.R. (2016). *Regime termal e tectônica tipo thin-skin na zona externa da Faixa Brasília*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 109p.
- Miall, A.D. (1996). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer, Milan. 582 p.
- Miall, A. D. (2000). *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. 3rd ed. Springer, Berlin. 616 p.

- Misi, A. (1999). *Um modelo de evolução metalogenética para os depósitos de zinco e chumbo hospedados em sedimentos proterozóicos de cobertura do Cráton do São Francisco (Bahia e Minas Gerais)*. Tese Professor Titular, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 151 pp.
- Misi, A., Kaufman, A.J., Veizer, J., Powis, K., Azmy, K., Boggiani, P.C., Gaucher, C., Teixeira, J.B.G., Sanches, A.L., Iyer, S.S. (2007). Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. *Chemical Geology*, 237, 143–167.
- Misi, A., Kaufman, A.J., Azmy, K., Dardenne, M.A., Sial, A.N., Oliveira, T.F. (2011). Neoproterozoic successions of the Sao Francisco Craton, Brazil: the Bambui, Una, Vazante and Vaza Barris/Miaba groups and their glaciogenic deposits. *Geological Society, London, Memoirs*, 36:509-522.
- Monteiro, L.V.S. (1997). *Contribuição à gênese das mineralizações de zinco da Mina de Vazante, MG*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 159p.
- Monteiro, L.V.S. (2002). *Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 317 p.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Juliani, C., Oliveira, T.F. (2006). Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 28:201-234.
- Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Juliani, C., Oliveira, T.F. (2007). Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, 1:362-381.
- Oliveira, T.F. (1998). As Minas de Vazante e de Morro Agudo. *Workshop dos Depósitos minerais brasileiros de metais base*, p. 48-57. UFBA/ADIM B.
- Oliveira, G.D. (2013). *Reconstrução paleoambiental e quimioestratigrafia dos carbonatos hospedeiros do depósito de zinco silicatado de Vazante, MG*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, DF, 86p.
- Paniago, L.N. (2011). *Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb de Morro Agudo. Universidade de Brasília, Grupo Vazante*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, DF, 89p.
- Pinho, J.M.M., Dardenne, M.A., Rigobello, A.E. (1989). Evolução tectônica da mineralização de zinco de Vazante. *V Simpósio de Geologia do Núcleo Minas Gerais, Anais, Bol.110*, p. 275-276. SBG.
- Pinho, J.M.M., Féboli, W.L., Signorelli, N., Tuller, M.P., Brito, D.C., Ribeiro, J.H., Baptista, M.C., Silva, R.N. (2017). *Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unaí*,

- Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas*. Belo Horizonte: CPRM. Escala 1:100.000. 344p.
- Queiroz, C.L., Jost, H. (1998). Polycyclic deformation on Archean crustal segment of the Goiás Massif, central Brazil. *In: International Conference on Basement Tectonics, 14, Proceed.*, p. 166-169.
- Reading, H.G. (Ed.) (1996). *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science Publications, Oxford, 688p.
- Rigobello, A.E., Branquinho, J.A., Dantas, M.G. Da S., Oliveira, T.F., Neves-Filho, W. (1988). Mina de zinco de Vazante. *In: Shobbenhaus, C., & Coelho, C.E.S., (Eds.), Principais depósitos minerais do Brasil, DNPM, 3:101-110.*
- Rodrigues, J.B. (2008). *Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí – Um estudo de zircões detríticos e Idades Modelo Sm-Nd*. Tese de doutorado, Universidade de Brasília – UnB. 128p.
- Rodrigues, J.B., Pimentel, M.M., Buhn, B., Matteini, M., Dardenne, M.A., Alvarenga, C.J.S., Armstrong, R.A. (2012). Provenance of the Vazante Group: New U–Pb, Sm–Nd, Lu–Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. *Gondwana Research*. 21. 439–450.
- Romagna, G. & Costa, R.R. (1988). Jazida de zinco e chumbo de Morro Agudo, Paracatu, Minas Gerais. *In: Schobbenhaus, C., e Coelho, C.E.S., (Coords.). Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília, DNPM, v. III, p. 83-90.
- Rosman, J.R., Taylor, P.D. (1998). Isotopic compositions of the elements (technical report): commission on atomic weights and isotopic abundances. *Pure Appl Chem* 70: 217–235.
- Rubo, R.A. & Monteiro, L.V.S. (2010). Sistemática de isótopos de oxigênio e carbono aplicada ao estudo da evolução metalogenética do depósito de Zn-Pb de Morro Agudo (MG). *Brazilian J. Geol.* 40, 438–452.
- Santana, A.V.A.D. (2011). *Estratigrafia, sedimentologia e proveniência das unidades superiores do Grupo Vazante na região da fazenda Fagundes, Paracatu, MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 136p.
- Santos R.V., Alvarenga C.J.S., Dardenne M.A., Sial A.N. & Ferreira V.P. (2000). Carbon and oxygen isotope profiles across Meso-Neoproterozoic limestones from central Brazil: Bambuí and Paranoá Groups. *Precambrian Res.*, 104:107- 122.
- Santos, R.V., Alvarenga, C.J.S., Babinski, M., Ramos, M.L.S., Cukrov, N., Fonseca, M.A., Sial, A. N., Dardenne, M.A., Noce, C.M. (2004). Carbon isotopes of Mesoproterozoic–

- Neoproterozoic sequences from Southern São Francisco craton and Araçuaí Belt, Brazil: Paleographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 18. 27–39
- Slezak, P.R. (2012). *Geology, Mineralogy and Geochemistry of the Vazante Northern Extension Zinc Silicate Deposit, Minas Gerais, Brazil*. Dissertação de Mestrado. Queen's University, Kingston, Canada. 116p.
- Slezak, P.R., Olivo, G.R., Oliveira, G.D., Dardenne, M.A. (2014). Geology, mineralogy, and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, S.N.T., n. 56, p. 234 – 257.
- Signorelli, N., Pinho, J.M.M., Tuller., M.P., Baptista, M.C., Brito, D.C. (2013). *Folha Lagamar SE.23-Y-A-III: estado de Minas Gerais*. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM. Projeto Vazante-Paracatu. Programa Geologia do Brasil.
- Sotero, M.P., Caxito, F.A., Dias., P.H.A., Sotero, B.A. (2019). Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da Mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais.
- Valeriano, C.M., Dardenne, M.A., Fonseca, M.A., Simões, L.S.A., Seer, H.J. (2004). A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 575-592.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebner, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F., Podlaha, O.G., Strauss, H. (1999).  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 59-88.
- 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. *Compt. Rendus Geosci.* 339, 240–258.
- Yoshioka, H., Asahara, Y., Tojo, B., Kawakami, S. (2003). Systematic variations in C, O and Sr isotopes and elemental concentrations in Neoproterozoic carbonates in Namibia: implications for glacial to interglacial transition. *Precambrian Research*, 124, 69–85.
- Walker, R.G. & James, N.P. (Eds.) (1992). *Facies Models: Response to sea level change*. Geological Association of Canada, Toronto, 409 p.
- Werner, R.A. & Brand, W.A. (2001). Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 15:501–519.