



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

**ESTRATIGRAFIA, GEOQUÍMICA E ISÓTOPOS DE C, O E Sr DO GRUPO  
BAMBUÍ A LESTE DA FALHA DE SÃO DOMINGOS, NE de Minas Gerais.**

Dissertação de Mestrado Nº286

RAFAEL OLIVEIRA SANTANA

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS JOSÉ SOUZA DE ALVARENGA

Brasília - DF

2011

RAFAEL OLIVEIRA SANTANA

ESTRATIGRAFIA, GEOQUÍMICA E ISÓTOPOS DE C, O E Sr DO GRUPO BAMBUÍ  
A LESTE DA FALHA DE SÃO DOMINGOS, NE de Minas Gerais.

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós Graduação em Geologia, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção de grau em Mestre em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Regional.

Orientador: Prof. Dr. Carlos José Souza de Alvarenga.

Brasília – DF

2011

RAFAEL OLIVEIRA SANTANA

ESTRATIGRAFIA, GEOQUÍMICA E ISÓTOPOS DE C, O E Sr DO GRUPO BAMBUÍ  
A LESTE DA FALHA DE SÃO DOMINGOS, NE Minas Gerais.

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós Graduação em Geologia,  
da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção de grau em  
Mestre em Geologia. Área de Concentração: Geologia Regional

Aprovada em \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Carlos Jose Souza de Alvarenga (Orientador)  
Universidade de Brasília - UnB

---

Dr. Paulo César Boggiani (Membro externo)  
Universidade de São Paulo - USP

---

Dr<sup>a</sup>. Lucieth Cruz Vieira  
Universidade de Brasília - UnB

Brasília - DF

2011

Aos meus pais.  
A meus amigos.  
A todos os leitores.

## AGRADECIMENTOS

A CAPES pelo apoio financeiro, ao meu orientador prof. Alvarenga, pela oportunidade de trabalhar na região e no contexto geológico em que trabalhei, além do aprendizado que recebi ao longo desses mais de 2 anos. Agradeço a todos os professores da UnB em especial ao professor Elton Luiz Dantas pelo total apoio a ideia de 4 baianos entrassem no mestrado da UnB. Outros professores que de alguma maneira merecem ser lembrados são o Dardenne, Roberto Ventura, Lucieth, Adalene, Claudinei, Nilson, Cesar, etc. que de alguma maneira me ajudaram muito tanto no profissional quanto no pessoal. Agradeço a toda galera acolhedora de Brasília em especial a Faustela (fiador), Leo, Six, Fabinho, Lara, Enio, Zero, Lacreia a toda galera do C.A. todos que tive contato. Agradeço muito aos 3 irmãos de geologia que tenho, que entraram nesse barco comigo, Aninha, Ganja e Meta. Um agradecimento especial a minha namorada Ana Claudia pela ajuda indispensável na formatação e discussões geológicas, além da paciência. Meus pais e minha família eu agradeço a todo tempo, pois sem eles não estaria aqui. Muito obrigado a todos.

## RESUMO

A sedimentação pelito-carbonática do grupo Bambuí a leste da falha de São Domingos (Seção Ribeirão Caldeira - SRC), NE de Minas Gerais é marcada por episódios de inundações, exposições, retrabalhamentos, passíveis de serem correlacionados em escala bacinal. Os estudos realizados nessa dissertação permitiram definir nove fácies nessa porção da bacia, que são: Dolomito Estromatolítico – Doe; Calcarenito Laminado – Clm; Calcarenito/Dolarenito Oolítico – Cao; Dolomito Laminado – Dlm; Dolomito “Cristalino” – Dic; Pelito Laminado – Plm; Pelito com lentes de Arenito – Pla; Pelito com lentes de Carbonato – Plc e Calcarenito com níveis de Calcirudito – Cacr e sete associações de fácies - Recife estromatolítico - Laguna Restrita e Aberta - Bancos Oolíticos - Canais de Maré Dominado por Onda - Bancos Carbonáticos - Pelitos de Borda de Plataforma - Pelitos Marinhos, que perfazem a plataforma carbonática em rampa do grupo Bambuí na região. Os dados isotópicos de carbono levantados ao longo da estratigrafia do grupo Bambuí na SRC, apresentam valores negativamente anômala em  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  (ex.  $-0,86\text{‰}$ ) na sua base. À medida que o empilhamento estratigráfico vai adentrando o grupo Bambuí, os valores de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  obtidos nas amostras, aumentam gradativamente chegando a um máximo de  $14,46\text{‰}$ , em carbonatos do topo da formação Sete Lagoas. Abaixo desse pacote com valores elevados de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  uma espessa camada de dolomitos é um marco na estratigrafia do grupo. Estes dolomitos, presentes na parte superior da formação Sete Lagoas mostra feições cársticas neoproterozóicas, e em seu topo é marcando a primeira discordância regional de 2ª ordem do grupo Bambuí. Essas feições carsticas mostram características importantes para um possível reservatório de hidrocarbonetos. Na sequência II de 2ª ordem que preencheu a bacia Bambuí, inundações regionais e locais com os ciclos de raseamento marcados pela aparição de bancos de carbonatos, por vezes oolíticos são observados até o final da seção. A seção estratigráfica do grupo Bambuí levantada no ribeirão Caldeira – SRC apresenta elementos sedimentológicos, estratigráficos e isotópicos que permitiram uma correlação com dados de subsuperfície (poço 1-RC-01-GO), com base na moderna estratigrafia de sequências, e assim individualizar duas sequências de 2º ordem e inúmeras de mais alta frequência.

## ABSTRACT

The pelito-carbonate sedimentation of the Bambuí Group east of the fault of São Domingo (Caldeira river Section - SRC) is characterized by episodes of flooding, exhibitions, retrabalhamentos, which can be correlated bacinal scale. The studies in this thesis allowed to define facies 9 - stromatolitic dolomite - Doe; Laminated Calcarenite - Clm, calcarenite / Dolarenito oolitic - Cao, dolomite Lamine - dlm; dolomite "Crystal" - Dic; Pelito Lamine - Plm; Pelito with lenses of sandstone - Pla; Pelito lenses of carbonate - Plc and calcarenite with levels of Calcirudito - Crca and seven facies associations - Recife stromatolitic - Laguna Restricted and Open - Banks oolitic - Channels Dominated by Tidal Wave - Banks carbonate - pelites Edge Platform - Marine pelites, which make up the platform carbonate ramp of the Bambuí Group in the region. Carbon isotope data collected along the stratigraphy of the Bambuí Group in SRC, have negative anomalous values in  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) (eg -0.86 ‰) at its base. As will entering the stacking stratigraphic group Bambuí values  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) obtained in the samples increased gradually reaching a maximum of 14.46 ‰ carbonate at the top of Sete Lagoas formation. Below this package with high values of  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) a thick layer of dolomite is a milestone in the stratigraphy of the group. These dolomites, present at the top of the Sete Lagoas formation shows Neoproterozoic karst features and its top is the first regional unconformity marking the 2nd order of the Bambuí Group. These karst features show important characteristics for a possible reservoir of hydrocarbons. Following II 2nd order that filled the Bambuí basin, regional and local flood cycles raseamento marked by the appearance of carbonate banks, sometimes oolitic are observed until the end of the section. The stratigraphic section of the Bambuí Group raised the stream Boiler - SRC has elements sedimentological, stratigraphic and isotopic data that allowed a correlation with subsurface data (well 1-RC-01-GO), based on modern sequence stratigraphy, and thus distinguish two sequences of 2nd order and many more high frequency.

## LISTA DE FIGURAS

Dissertação

- Figura 1 – Mapa Geológico simplificado da área de estudo, contemplando a SRC, o poço 1-RC-01-GO, além do sistema de falhas de São Domingos, limite entre o Cráton do São Francisco - CSF e a Faixa Brasília - FB. (A – A´) localização da Seção Estrutural (CPRM, 2011).\_\_\_\_\_ 12
- Figura 2 – Fotografia mostrando o Ribeirão Caldeira no período de estiagem\_\_\_\_\_ 13
- Figura 3 - O Cráton do São Francisco e suas Faixas Móveis Marginais. Modificado de Almeida (1981).\_\_\_\_\_ 17
- Figura 4 - Nova proposta para o limite do Cráton do São Francisco com o Orógeno Araçuaí (aumento do Orógeno para NNW), segundo Cruz (2004).\_\_\_\_\_ 18
- Figura 5 – Mapa geológico da Faixa Brasília, com os domínios tectônicos da faixa interna e externa. (Modificado de Dardenne, 2000).\_\_\_\_\_ 22
- Figura 6 – Modelo esquemático de tipos de terminações estratiais associados a uma seção Dip em uma bacia de margem passiva. Catuneanu, 2006.\_\_\_\_\_ 27
- Figura 7 – Figura esquemática demonstrando a relação entre nível do mar, nível eustático e espaço disponível e utilizado para acumulação de sedimentos. Posamentier et al, 1988.\_\_\_\_\_ 28
- Figura 8 – Perfil de equilíbrio fluvial esquemático (vermelho) e o reajuste sofrido pela presença de lago antes do rio desaguar no oceano. Catuneanu, 2006.\_\_\_\_\_ 29
- Figura 9 – Curva de variação do nível de base e de taxa de variação do nível de base com a taxa de sedimentação constante. Catuneanu, 2006.\_\_\_\_\_ 30
- Figura 10 – Padrões progracionais, retrogradacionais e agradacionais com seus respectivos empilhamentos verticais típicos. Van Wagoner et al., (1990).\_\_\_\_\_ 31
- Figura 11 – Modelo de sequência estratigráfica Transgressiva-Regressiva (Embry & Johannessen, 1992).\_\_\_\_\_ 33
- Figura 12 – Modelo esquemático de uma sequência estratigráfica hipotética, com a interpretação das sequências genética (Limites em azul) e deposicional (limites em vermelho). Notar que dentro da sequência genética há uma discordância.\_\_\_\_\_ 34



Figura 13 – Gráfico apresentando os teores médios de  $\delta^{18}\text{O}$  para algumas substâncias terrestres (Allegre, 2008).\_\_\_\_\_36

Figura 14 - Curva com evolução do  $\delta^{13}\text{C}$  no Neoproterozóico. As siglas S1 e S2 são referentes às incursões glaciais Esturtianas e V1 e V2 Marinoanas. PC/C passagem do cambriano para o pré-cambriano. Aharon, 2005. \_\_\_\_\_38

Figura 15 - Curva com evolução da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  a partir da assembleia do supercontinente Rodínia ate o presente (Halverson et al. 2007).\_\_\_\_\_40

#### Artigo – Cap.6

Figura 1 – Mapa Geológico simplificado da área de estudo, contemplando a SRC, o poço 1-RC-01-GO, além do sistema de falhas de São Domingos, limite entre o Cráton do São Francisco - CSF e a Faixa Brasília - FB. (A – A') localização as Seção Estrutural.\_\_\_\_\_44

Figura 2 – Litologia e Raio Gama do poço 1-RC0001-GO (Clark e Fugita, 2001). \_\_\_\_\_44

Figura 3 – Comparação estratigráfica do grupo Bambuí dos lados leste e oeste da falha de São Domingos. Modificado de Alvarenga & Dardenne, 1978.\_\_\_\_\_46

Figura 4 – Seção Geológica/Estrutural (modificado de Alvarenga, 1978) apresentando o sistema de falhas de São domingos – passagem da FB para o CSF e a Seção do Ribeirão Caldeira \_\_\_\_\_47

Figura 5 – Mapa geológico da área de estudo (Alvarenga, 1978) com a localização das 7 seções estratigráficas levantadas \_\_\_\_\_49

Figura 6: Primeira prancha de fotos\_\_\_\_\_53

Figura 7: Primeira prancha de fotomicrografias\_\_\_\_\_54

Figura 8: Segunda prancha de fotomicrografias\_\_\_\_\_56

Figura 9: Segunda prancha de fotos\_\_\_\_\_58

Figura 10 – Modelo de deposicional de uma plataforma o tipo Rampa. Modificado de Tucker e Wrigth, 1990\_\_\_\_\_59

Figura 11: Terceira prancha de fotos\_\_\_\_\_61

Figura 12 – Zoom na fotomicrografia em lamina petrográfica da amostra 4SRC-181. Detalhe do preenchimento de sílica radial, em microporos pré-existentes, em pelitos carbonáticos do topo da formação Sete Lagoas.\_\_\_\_\_62

- Figura 13 – Bloco diagrama esquemático do momento de carstificação dos carbonatos da formação Sete Lagoas. \_\_\_\_\_ 65
- Figura 14 – Gráfico de dispersão Sr x MnO \_\_\_\_\_ 67
- Figura 15 – Gráfico de dispersão MgO x CaO nas amostras da SRC. Em vermelho limite calcário e dolomitos. \_\_\_\_\_ 68
- Figura 16 – Gráfico de dispersão  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) x  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB) da SRC e do poço. FSL – formação Sete Lagoas; FSSH – formação Serra de Santa Helena; FLJ – formação Lagoa do Jacaré \_\_\_\_\_ 69
- Figura 17 – Curva com evolução da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  a partir da assembleia do supercontinente Rodínia ate o presente (Halverson et al. 2007). Circulo em vermelho formação Sete Lagoas da SRC. Circulo em azul formação Lagoa do Jacaré da SRC. \_\_\_\_\_ 70
- Figura 18 – Seção Ribeirão Caldeira – SRC com o posicionamento das laminadas petrográficas. A direita os valores de % para o CaO/MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ‰ para  $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) e  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB). As associações de fácies, as unidades litoestratigráficas também e as interpretações com base na estratigrafia de seqüências também estão presentes \_\_\_\_\_ 75
- Figura 19 – Gráfico de dispersão  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) x  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB) da seção do ribeirão Caldeira - SRC com o poço 1-RC-GO (Tonietto, 2011). FSL – formação Sete Lagoas; FSSH – formação Serra de Santa Helena; FLJ – formação Lagoa do Jacaré. Linha tracejada preta marca a passagem da seqüência I para seqüência II (2º ordem) do grupo Bambuí. \_\_\_\_\_ 76
- Figura 20 – Correlação regional da Seção Aflorante (SRC) com o poço 1RC-01-GO. A direita das seções perfis de  $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) e  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB) Utilizar legenda apresentada na Fig.13 para as litologias \_\_\_\_\_ 81

## LISTA DE TABELAS

### Dissertação

- Tabela 1 – Diversas subdivisões estratigráficas para o Grupo Bambuí (Nobre-Lopes, 1995) \_\_\_\_\_ 23

### Artigo

- Tabela 1 – Formações e principais litologias do Grupo Bambuí \_\_\_\_\_ 43
- Tabela 2 - Tabela de Associação de fácies \_\_\_\_\_ 51

Tabela 3 – Fácies, Associação de fácies, Ambiente e sistema deposicional do grupo Bambuí na SRC. \_\_\_\_\_ 60

Tabela 4 – Isótopos de C, O, Sr e composição química da seção estratigráfica do Ribeirão Caldeira (SRC) \_\_\_\_\_ 66

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	9
1.1. Apresentação	9
1.2. Objetivos	11
1.3. Localização	11
<b>2. AMOSTRAGEM, MATERIAIS E MÉTODOS</b>	13
2.1. Introdução	13
2.2. Amostragem	14
2.3. Preparação das Amostras	14
2.4. Análises químicas isotópicas e petrográficas	14
<b>3. GEOLOGIA REGIONAL</b>	15
3.1. Introdução	15
3.2. Cráton São Francisco	16
3.3. Faixa Brasília	18
3.4. Grupo Bambuí	23
<b>4. ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS</b>	26
4.1. Introdução	26
4.2. Conceitos Fundamentais	27
4.2.1. Terminações Estratais	27
4.2.2. Nível de base e Acomodação	28
4.2.3. Transgressão – Regressão	29
4.2.4. Progradação – Retrogradação – Agradação	31
4.3. Tipos de Sequências Estratigráficas	32
4.3.1. Sequência Depositional	32
4.3.2. Sequência Transgressiva-Regressiva (T-R)	33
4.3.3. Sequência Estratigráfica Genética	34
<b>5. GEOQUÍMICA ISOTÓPICA (C, O e Sr)</b>	35
5.1. Isótopos Estáveis	35

5.1.1.	Isótopos de Oxigênio .....	36
5.1.2.	Isótopos de Carbono.....	37
<b>5.2.</b>	<b>Isótopos Radiogênicos - Sr.....</b>	<b>39</b>
<b>6.</b>	<b>ARTIGO a ser submetido para publicação - O Grupo Bambuí a leste da falha de São Domingos: Um registro da exposição subaérea dos carbonatos Neoproterozóicos.....</b>	<b>41</b>
<b>6.1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>41</b>
<b>6.2.</b>	<b>Geologia Regional.....</b>	<b>42</b>
<b>6.3.</b>	<b>Geologia da Serra de São Domingos.....</b>	<b>45</b>
<b>6.4.</b>	<b>Amostragem e Métodos.....</b>	<b>48</b>
<b>6.5.</b>	<b>Fácies da Seção Ribeirão Caldeira – SRC.....</b>	<b>50</b>
6.5.1.	Dolomito Estromatolítico – Doe.....	51
6.5.2.	Calcarenito Laminado – Clm .....	52
6.5.3.	Calcarenito/Dolarenito Oolítico – CaO .....	52
6.5.4.	Dolarenito Laminado – Dlm .....	52
6.5.5.	Dolomito “Cristalino” – Dic .....	55
6.5.6.	Calcarenito com níveis de Calcirudito– Cacr .....	57
6.5.7.	Pelito com Lentes de Carbonato – Plc.....	57
6.5.8.	Pelito com Lentes de Arenito – Pla.....	57
6.5.9.	Pelito Laminado – Plm.....	59
<b>6.6.</b>	<b>Associação de fácies e Sistema deposicional .....</b>	<b>59</b>
6.6.1.	Introdução:.....	59
6.6.2.	Recife Estromatolítico .....	60
6.6.3.	Laguna Restrita e Aberta .....	60
6.6.4.	Bancos carbonáticos.....	62
6.6.5.	Bancos Oolíticos.....	62
6.6.6.	Canal de maré dominado por onda .....	63
6.6.7.	Pelitos de borda de plataforma .....	63
6.6.8.	Pelitos Marinhos .....	64
6.6.9.	Plataforma em rampa do grupo Bambuí na SRC.....	64
<b>6.7.</b>	<b>Quimioestratigrafia .....</b>	<b>65</b>
6.7.1.	Apresentação dos dados.....	65
6.7.2.	Resultados.....	67
<b>6.8.</b>	<b>Evolução Estratigráfica do grupo Bambuí na SRC .....</b>	<b>70</b>
6.8.1.	Introdução.....	70

6.8.2. Discussão .....	71
<b>6.9. Associações Estratigráficas.....</b>	<b>74</b>
6.9.1. Introdução.....	74
6.9.2. Sequência I.....	77
6.9.3. Sequência II.....	79
<b>6.10. Conclusões .....</b>	<b>80</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação

O grupo Bambuí no norte de Minas Gerais é caracterizado por uma sedimentação diversificada (calcários, dolomitos, pelitos, arenitos, etc.), fato que não é tão comum na estratigrafia do grupo. Outro fator importante, na estratigrafia do grupo, no norte de Minas Gerais é a influencia da tectônica brasileira. Nessa região grandes lineamentos estruturais, separam compartimentos tectônicos regionais. Na área de estudo esse lineamento é representado pela Falha de São Domingos, que separa a Faixa Brasília do Cráton do São Francisco.

No compartimento a oeste da Falha de São Domingos a geologia do Grupo Bambuí é limitada, pois não ocorrem as unidades carbonáticas basais. Na porção a leste da falha de São Domingos (área de estudo) as unidades basais foram soerguidas tectonicamente, deixando-as na superfície ao longo do Ribeirão Caldeira. Vale lembrar que a única descrição, que contem a base do grupo Bambuí no lado leste da falha de São Domingos é a do poço exploratório 1-RC-01-GO, realizado pela PETROBRAS na busca por hidrocarbonetos.

Nesta dissertação são apresentadas interpretações estratigráficas, dados geoquímicos e isotópicos da seção em afloramentos ao longo do Ribeirão Caldeira, norte de Minas Gerais. Inúmeros são os interesses para o entendimento estratigráfico da região, dentre eles vale destacar a crescente busca por Hidrocarbonetos e rochas fosfáticas na região.

O levantamento é iniciado no topo do grupo Paranoá, onde são descritos dolomitos cinza, estromatolítico, com valores de delta  $^{13}\text{C}$  levemente positivos. O contato com os carbonatos basais do grupo Bambuí é notado inicialmente pela mudança litológica. Não são mais descritas estruturas estromatolíticas e o incremento siliciclástico, do grupo Bambuí, é notório. A geoquímica isotópica mostra também que as rochas mais novas têm valores levemente negativos em delta  $^{13}\text{C}$ , evidenciando a discordância que há entre esses dois grupos de rochas. O pacote

inicial se estende por cerca de 40 metros adentrando o grupo Bambuí e mais uma quebra importante é descrita na seção. O incremento siliciclástico some, os carbonatos ficam mais puros e após dezenas de metros passam a intercalarem-se com dolomitos laminados, que posteriormente prevalecem. Ao final um espesso pacote de dolomitos laminados, com mais de 100 m de espessura, apresentando estruturas de dissolução no topo foi descrito.

Após o pacote dolomítico, calcários intercalado com pelitos passam a preencher a bacia. São observados nesse pacote laminações plano-paralelas e estratificações cruzadas indistintas, mas que logo dão lugar a um espesso pacote de pelitos intercalados com lentes de arenito muito fino. Continuando a seção voltam os carbonatos, inicialmente intercalados com pelitos carbonáticos até que a um ponto onde prevalecem os carbonatos. Novamente outra inundação ocorre no Bambuí desta vez representada por folhelhos negros bem laminados, dando por fim a seção realizada nesse trabalho.

Com os dados gerados e processados da seção do Ribeirão Caldeira (SRC), uma correlação regional esquemática foi proposta para a SRC e o Poço 1-RC-01-GO. Foram obtidos resultados muito interessantes como: As duas seções do grupo Bambuí tem como embasamento dolomitos do grupo Paranoá; Ocorre um pacote negativamente anômalo na base do Bambuí nas duas seções correlacionadas; Ocorre um pacote dolomítico nas duas seções correlacionadas, sendo o pacote da SRC mais espesso; As fácies e associação de fácies encontrada nas duas seções são muito similares.

Aplicando a moderna estratigrafia de sequências associada a dados de isótopos de C e Sr, foi possível individualizar duas sequências de 2º ordem e inúmeras sequências de 3º e 4º ordens ao longo das seções. O Marco estratigráfico gerado no final do pacote dolomítico é a representação de um limite de sequência – LS, que apresenta evidências de exposição subaérea, registrada nas rochas Neoproterozóicas do norte de Minas Gerais.



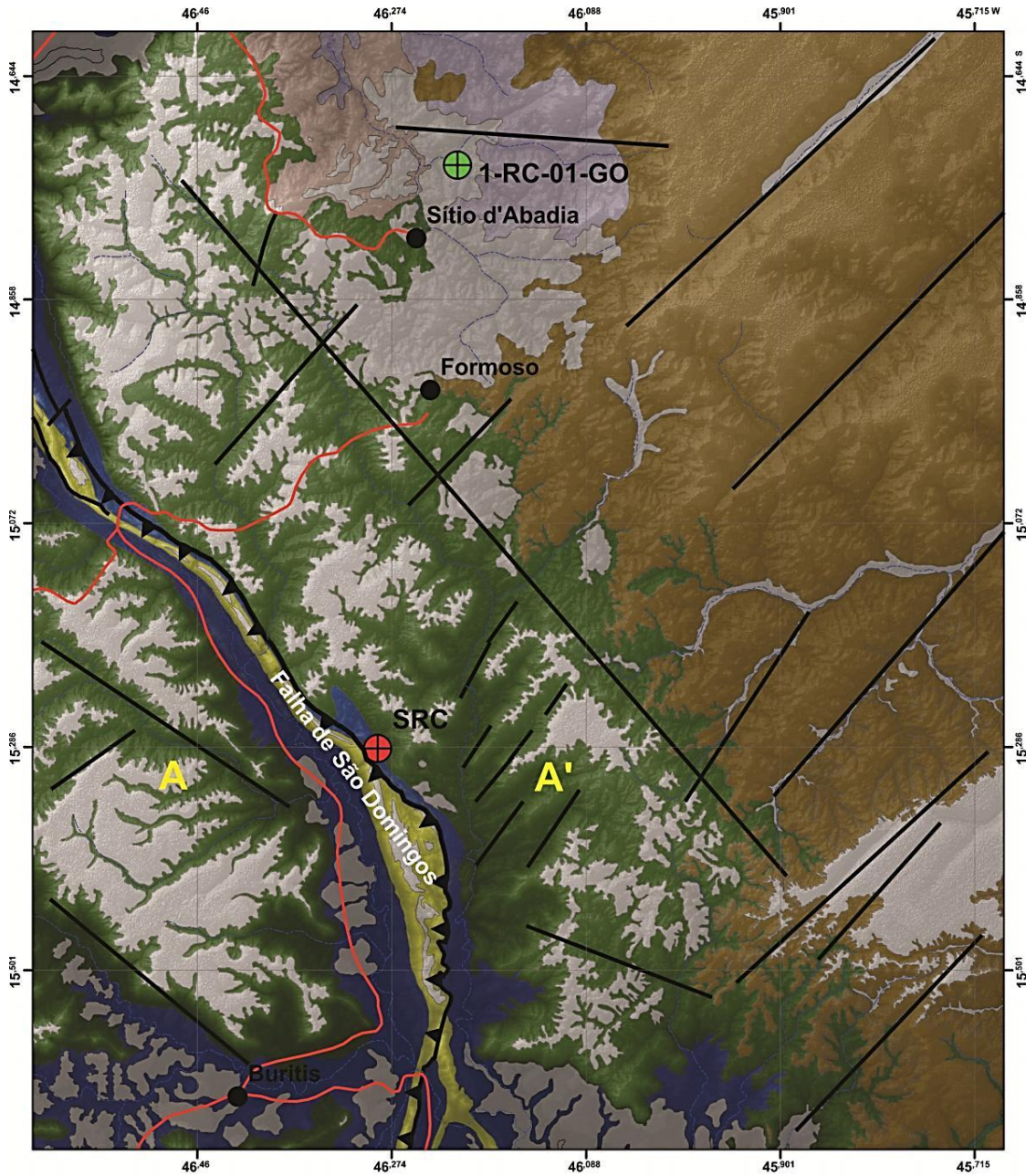
## 1.2. Objetivos

O principal objetivo dessa dissertação visa o entendimento tectono-estratigráfico do Grupo Bambuí a leste da Falha de São Domingos. Para tanto foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Entendimento das fácies e sistemas deposicionais;
- Elaboração de uma seção do Grupo Bambuí para a região do Ribeirão Caldeira;
- Interpretação de dados isotópicos (C, O e Sr), além de dados de litogeoquímica;
- Modelamento estratigráfico com base na moderna estratigrafia de sequências;
- Correlação estratigráfica de dados de superfície (seção do Ribeirão Caldeira) com dados de subsuperfície (poço 1-RC-01-GO).

## 1.3. Localização

A área de estudo está localizada no município de Formoso-MG, próximo ao limite entre o Cráton do São Francisco - CSF e a Faixa Brasília - FB, sendo a feição tectônica que marca essa passagem, representada pelo sistema de falhas de São Domingos (Alvarenga, 1978; Alvarenga & Dardenne, 1978) (Fig. 1). A área em questão dista cerca de 50 km do poço pioneiro 1-RC-01-GO, único registro da descrição das unidades basais do Grupo Bambuí a leste da falha de São Domingos.



### Legenda

#### Litologias

- Tercio Quaternário Detritico
- Formação Urucuia
- Grupo Bambuí: Formação Três Marias
- Grupo Bambuí: Formações Sete lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade
- Grupo Paranoá

#### Convenções Cartográficas

- + SRC - Seção Ribeirão Caldeira
- Poço 1-RC-01-GO
- Cidades
- Rodovias
- Drenagens
- Falhas e lineamentos
- Falhas de São Domingos



Mapa de Localização



1:500.000

Datum: South America 1969

Figura 1 – Mapa Geológico simplificado da área de estudo, contemplando a SRC, o poço 1-RC-01-GO, além do sistema de falhas de São Domingos, limite entre o Cráton do São Francisco - CSF e a Faixa Brasília - FB. (A – A') localização da Seção Estrutural (CPRM, 2011).



## 2. AMOSTRAGEM, MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Introdução

O levantamento da SRC foi executado em afloramentos contínuos e bem preservados, o que facilitou as interpretações e a correlação com os dados de subsuperfície (poço). A descrição foi feita no período de estiagem (19 a 23 de outubro de 2010), já que as rochas ficam mais expostas, devido a diminuição do fluxo do rio (Fig. 2).



Figura 2 – Fotografia mostrando o Ribeirão Caldeira no período de estiagem.

Em função da sinuosidade do Ribeirão Caldeira, os levantamentos incluíram 7 perfis que foram compostos em uma única seção. Ao todo foram descritos aproximadamente 900 metros de rochas do final do Grupo Paranoá, até o início da formação Três Marias no topo do Grupo Bambuí.

Para a interpretação e correlação dos dados de afloramento foi feita uma descrição detalhada das fácies que compõem principalmente as unidades carbonáticas da área de estudo (formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré).

Além dos afloramentos foram descritas 29 lâminas petrográficas, 3 amostras com o Mev, interpretados dados geoquímicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Rb e Sr) e isotópicos (C, O e Sr) de 82 amostras de rocha que auxiliaram na individualização das fácies, evolução estratigráfica e na correlação entre os levantamentos de superfície (seção no Ribeirão Caldeira) e subsuperfície (utilizando dados da bibliografia do poço 1-RC-01-GO)

## **2.2. Amostragem**

A coleta de amostras foi feita a fim de cobrir toda a estratigrafia do Grupo Bambuí na seção estudada, com ênfase aos afloramentos carbonáticos, que quando contínuos eram amostrados de cinco em cinco metros. Ao final as mais de 100 amostras de afloramento foram pré-selecionadas para posteriores análises químicas, isotópicas e confecção de lâminas petrográficas.

## **2.3. Preparação das Amostras**

Os ensaios iniciais das amostras foram realizados no laboratório de preparação de amostras do IG-UNB (Instituto de Geociências da Universidade de Brasília). Todas as amostras selecionadas (82 amostras no total) foram britadas e moídas, seguindo rotina vigente no laboratório, já que tanto para geoquímica quanto para os isótopos foram utilizados o pó de rocha total.

## **2.4. Análises químicas isotópicas e petrográficas**

As análises geoquímicas foram efetuadas no laboratório de Isótopos estáveis do Departamento de geologia - NEG-LABISE da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. As amostras foram determinadas por perda ao fogo e por fusão com tetraborato de lítio. As leituras foram realizadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku, modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, do LABISE-UFPE. Os resultados obtidos foram recalculados para 100% para considerar a perda ao fogo.

Os dados de isótopos estáveis foram obtidos pelo Espectrômetro de massa DELTA V PLUS com entrada dupla (dual inlet), que permite a análise de amostras por sistema on line e off line. Equipado com analisador GAS BENCH II com autosampler para determinação de razões isotópicas de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  em carbonato.

Para a análise de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , 50 mg de amostra pulverizada foram digeridas por ácido acético 0,5N. Após segundo ataque ácido com HCl 2,5N o Sr foi separado em colunas orgânicas primárias grandes. A razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  das amostras foi determinada pelo espectrômetro de massa de ionização termal, marca Finnigan MAT 262, no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília.

As amostras para análise no microscópio eletrônico de varredura – Mev (IG-USP) foram selecionadas devido ao percentual poroso. As imagens adquiridas pelo MEV são principalmente duas: imagem de elétrons secundários e imagem de elétrons retroespalhados (backscattered). As imagens do detector de elétrons secundários são utilizadas principalmente para estudar morfologia. As imagens do detector de elétrons retroespalhados nos indicam porções nas amostras que possuem elementos químicos com números atômicos diferentes. Quanto maior o brilho, maior o número atômico.

### **3. GEOLOGIA REGIONAL**

#### **3.1. Introdução**

Para o entendimento e posicionamento tectônico da área de trabalho, foi feito levantamento bibliográfico, a fim de elucidar as ideias sobre o Cráton do São Francisco e a Faixa Brasília, já que são grandes as influências dessas entidades tectônicas na geração e evolução do Grupo Bambuí. Em seguida uma breve descrição dessas três unidades crustais (Cráton do São Francisco, Faixa Brasília e o Grupo Bambuí).

### 3.2. Cráton São Francisco

A área do Cráton do São Francisco (Fig.3) se estende por grandes porções dos estados da Bahia (principalmente) e Minas Gerais. Almeida (1981) delimita o Cráton do São Francisco da seguinte forma: a sul-sudeste, pela Faixa Araçuaí, a sul pela Faixa Alto Rio Grande, a oeste pela Faixa Brasília, a noroeste pela Faixa Rio Preto, a norte pela Faixa Riacho do Pontal e a nordeste pela Faixa Sergipana, sendo o esforço dessas faixas o resultante para moldar o Cráton no evento Brasileiro.

De acordo com Alkimim (1993), o Cráton do São Francisco é entendido, fundamentalmente, como uma feição do Proterozóico Superior, moldada pelo Evento Brasileiro, mas sendo consolidado como segmento da litosfera continental no Arqueano. Em outras palavras, o Cráton representa uma porção da crosta continental arqueana, formada por segmentos crustais como o Bloco Gavião, o Bloco Serrinha e o Bloco Jequié (Mascarenhas, 1979), que se chocaram no evento transamazônico e se comprimiram no Brasileiro.

Desse choque foi gerado um cinturão móvel Paleoproterozóico conhecido como Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá (Barbosa et al., 2003) e seu crono e lito-correlato Cinturão Salvador-Esplanada (Fig.3).

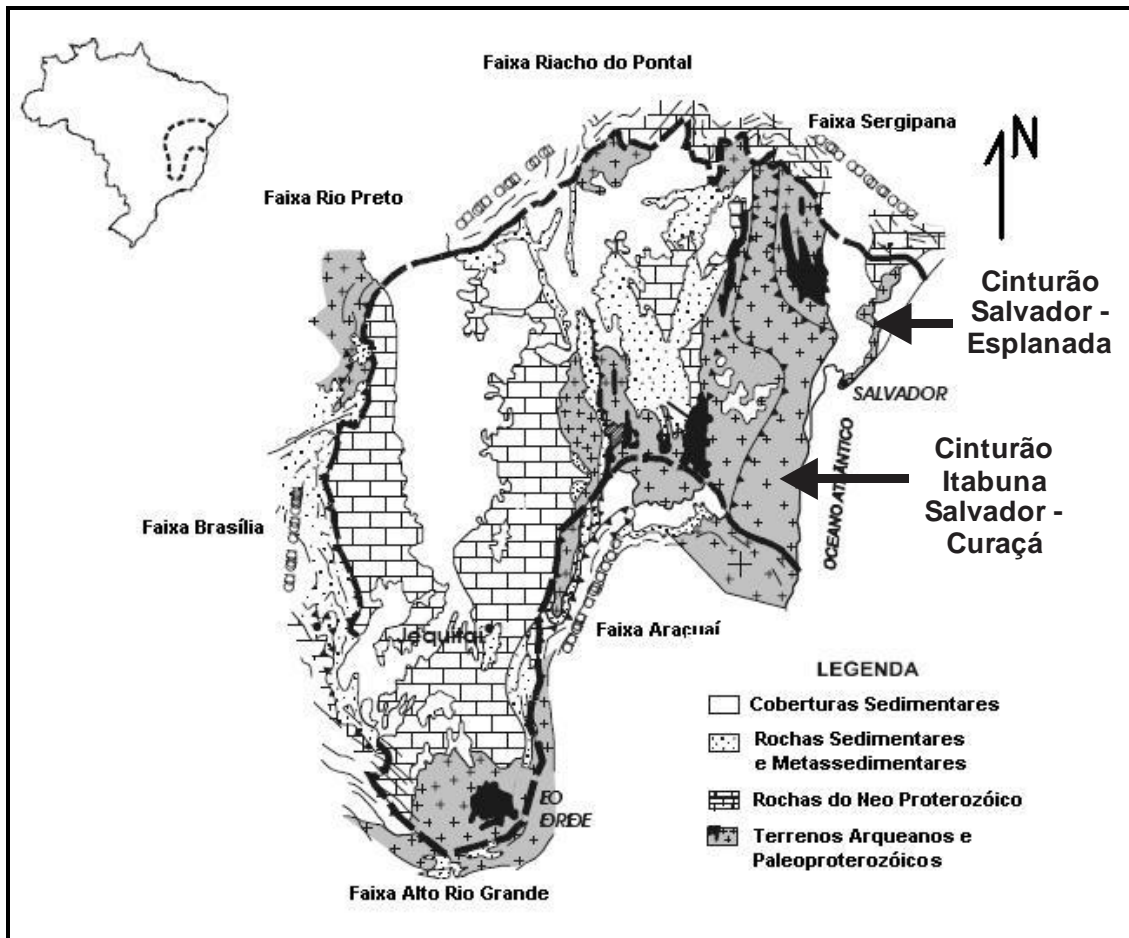


Figura 3 - O Crátón do São Francisco e suas Faixas Móveis Marginais. Modificado de Almeida (1981).

Cruz (2004) lança uma nova proposta para delimitação do Crátón do São Francisco alegando, que seu embasamento na porção sul-sudeste foi afetado por deformações dúcteis, durante o evento Brasiliano. A orogenia Araçuaí seria o gerador dessa deformação. Além disso, um grande movimento de massa com vergência centrípeta ao Crátón associada a uma tectônica compressional conhecida como “quebra-nozes” foi suficiente para deformar a Bacia Macaúbas, transformando-a no Orógeno Araçuaí. Dessa forma, a faixa de dobramentos Araçuaí estabelece contato com o Crátón do São Francisco a cerca de 100 km para norte a partir do limite estabelecido por Almeida (1981) (Fig.4).

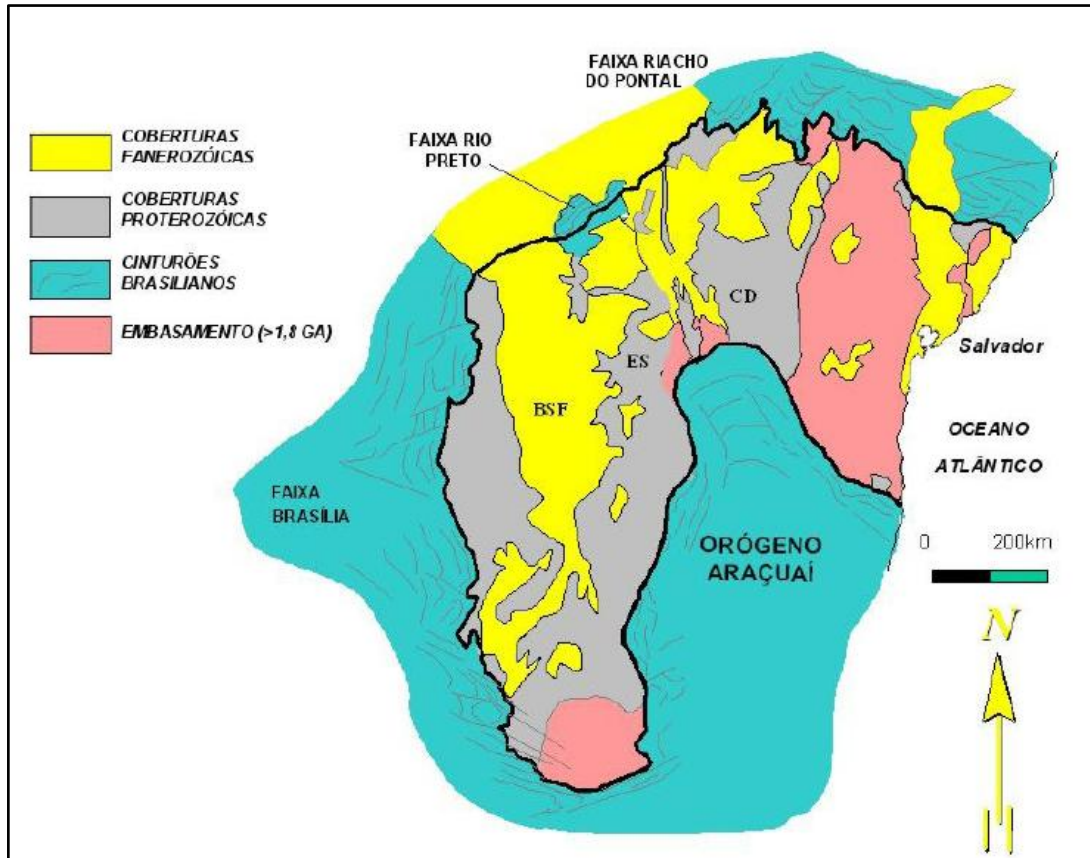


Figura 4 - Nova proposta para o limite do Cráton do São Francisco com o Orógeno Araçuai (aumento do Orógeno para NNW), segundo Cruz (2004).

### 3.3. Faixa Brasília

A Faixa de Dobramentos Brasília (Fig.5), situada na parte leste da Província Tocantins e cuja extensão supera 1.100 km, desenvolveu-se na borda ocidental e meridional do Cráton São Francisco durante o Ciclo Brasileiro (Almeida et al., 1977). Essa faixa neoproterozóica representa o complexo cinturão de dobras e falhas de empurrão com vergências tectônica e metamórfica em direção ao Cráton São Francisco (Fuck et al., 1994).

Dados geocronológicos U-Pb e Rb-Sr sugerem que a história tectono-metamórfica da Faixa de Dobramentos Brasília foi marcada por dois eventos metamórficos, o primeiro evento termo-tectônico em ~750 Ma e o último em ~630-600 Ma, que representa o ápice do metamorfismo na faixa, correspondendo à Orogênese Brasileira (Pimentel et al., 1991, 1992).



A compartimentação longitudinal da Faixa de Dobramentos Brasília - FB, de leste para oeste, em Zona Externa, Zona Interna, Maciço de Goiás e Arco Magmático de Goiás (Costa & Angeiras, 1971; Dardenne, 1981; Fuck et al., 1993) foi aceita pela comunidade científica até recentemente, quando Fuck et al. (2005) atualizaram a divisão.

A FB possui estruturação marcada por dois ramos de direções distintas: um mais setentrional, de orientação NE, e outro mais meridional, de orientação NW, que apresentam uma evolução geotectônica única, mas com características bem distintas (Araújo Filho, 1999). O encontro dos dois ramos marca uma grande estrutura regional definida como Flexura dos Pirineus (Costa & Angeiras, 1971; Araújo Filho, 1980), posteriormente renomeada de Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho, 1999; 2003) que consiste de lineamentos WNW-SSE, situados à mesma latitude do Distrito Federal, nas imediações da cidade de Pirenópolis.

Seguindo a divisão da FB em dois ramos distintos, denominados de Faixa Brasília Setentrional, ao norte da sintaxe, e Faixa Brasília Meridional, ao sul, têm-se a caracterização das unidades que compõem estas duas faixas, seguindo também uma nova compartimentação longitudinal, definida por Fuck et al. (2005):

A Faixa Brasília Setentrional estrutura-se em três compartimentos geologicamente distintos:

- i) Embasamento ortognáissico paleoproterozóico, representado pelo Bloco Almas-Dianópolis, que também inclui estreitas faixas de rochas supracrustais. Os terrenos paleoproterozóicos de Almas-Dianópolis formados por ortognaisses, granitóides deformados e algumas unidades supracrustais são atualmente interpretados como embasamento siálico da Faixa de Dobramentos Brasília sobre o qual foram depositados os grupos Araí e Natividade em ambiente de rift intracontinental, com seqüências transgressivas no topo, de provável idade Paleoproterozóica, composto por rochas sedimentares e vulcânicas metamorfizadas. Também ocorrem faixas restritas referentes aos grupos Paranoá e Bambuí;

- ii) Região que compreende o Maciço de Goiás, o Grupo Serra da Mesa e porções do Grupo Araxá. Inicialmente o Maciço de Goiás era definido pelos terrenos arqueanos do Bloco Crixás-Goiás, os terrenos paleoproterozóicos de Almas, Dianópolis e São Domingos, os complexos acamadados máficos-ultramáficos, o Complexo Anápolis-Itauçu e o Arco Magmático de Goiás. Atualmente o Maciço de Goiás compreende: o Bloco Arqueano Crixás-Goiás, constituído por ortognaisses de composição tonalítica a granodiorítica e em menor participação por greenstones belts; e os complexos máficos-ultramáficos de Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava e as seqüências vulcano-sedimentares associadas de Juscelândia, Indaianópolis e Palmeirópolis, respectivamente, que integram o núcleo metamórfico do braço norte da Faixa Brasília. O Grupo Serra da Mesa, de idade mesoproterozóica consiste principalmente de quartzitos e micaxistos com participação carbonática no topo da seqüência;
- iii) O Arco Magmático de Goiás, constituído por ortognaisses e seqüências vulcano-sedimentares Neoproterozóicos, representa a crosta menos espessa da província, segundo dados geofísicos (Soares et al., 2005). É subdividido em Arco Magmático de Mara Rosa na porção norte e Arco Magmático de Arenópolis na porção sul.

Na Faixa Brasília Meridional também são reconhecidos três compartimentos (Fuck et al., 2005):

- i) Depósitos sedimentares de margem passiva, representados pelo cinturão de dobras e empurrões, sobrepostos por rochas do Grupo Araxá, que consiste essencialmente em quartzitos micáceos e micaxistos com ocorrências locais de lentes de calcário e dolomito. Frequentemente são observadas associações com rochas vulcânicas que indicam que o Grupo Araxá representa uma melange ofiolítica, obductada sobre a margem continental por nappes de transporte W-E;

- ii) Núcleo metamórfico, representando por rochas de alto grau do Complexo Anápolis-Itauçu, compondo o eixo da faixa, e pequena porção do Arco Magmático de Goiás. O complexo é caracterizado por ortogranulitos de composição máfica-ultramáfica e tonalítica a granodiorítica, rochas metassedimentares associadas a granulitos aluminosos, leptinitos e granada gnaisses, rochas metavulcano-sedimentares e intrusões de granitóides. Inicialmente foi considerado como parte integrante do embasamento arqueano ou paleoproterozóico da Faixa de Dobramentos Brasília. Somente com dados geocronológicos recentes foi possível concluir que grande parte das rochas que compõem o complexo é neoproterozóica, e, portanto, não constituem o embasamento da Faixa de Dobramentos Brasília, e sim a exposição de rochas da própria faixa metamorfizada em alto grau, posteriormente alçadas tectonicamente e justapostas às rochas de mais baixo grau;
  
- iii) Prolongamento do Arco Magmático de Goiás, parcialmente encoberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná.

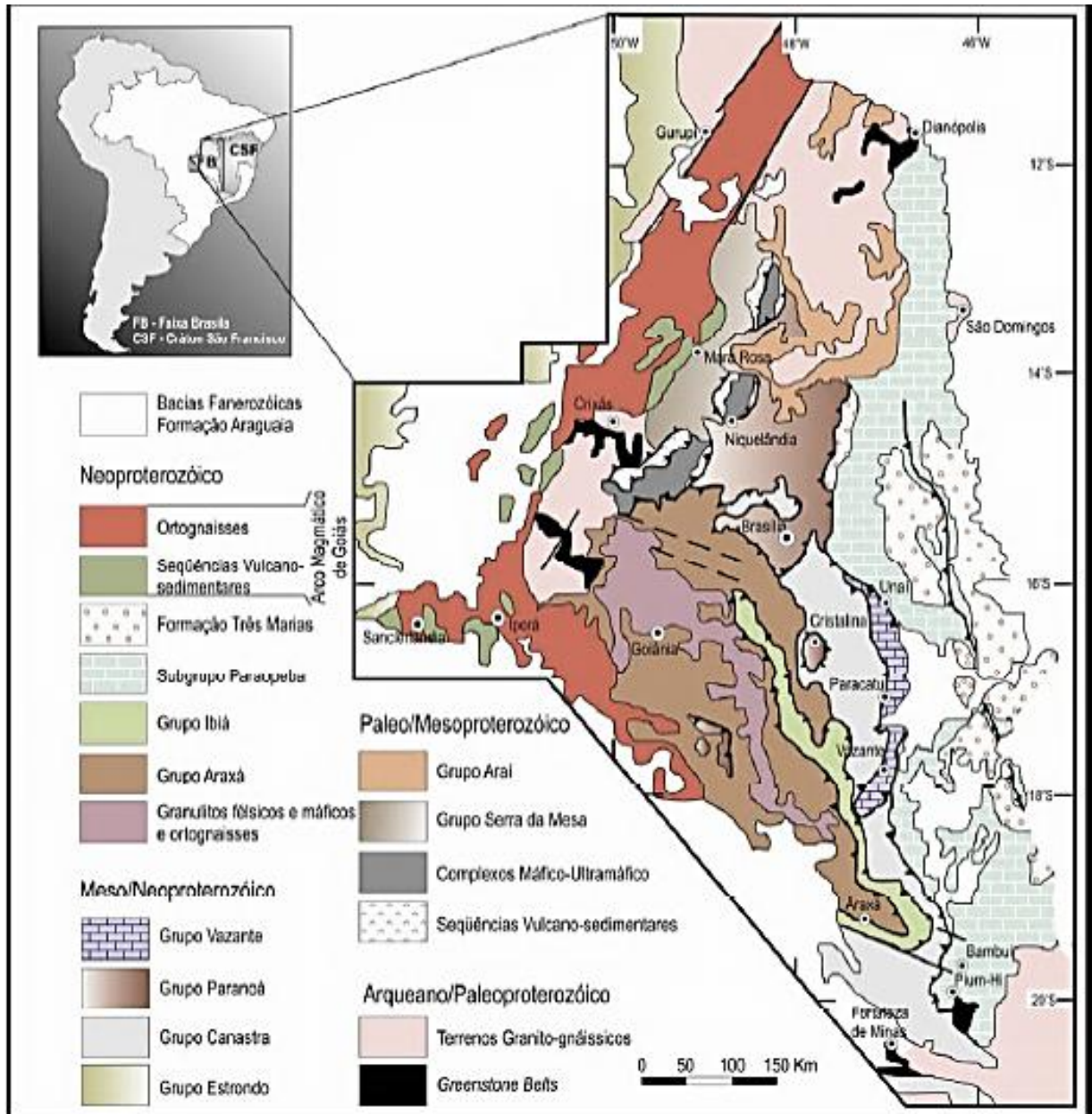


Figura 5 – Mapa geológico da Faixa Brasília, com os domínios tectônicos da faixa interna e externa. (Modificado de Dardenne, 2000).

### 3.4. Grupo Bambuí

As primeiras descrições relatadas de carbonatos, ao longo da bacia do rio São Francisco foram descritas pelo Barão de Eschwege, no ano 1817 (Martinez, 2007), mas a denominação Bambuí foi primeiramente adotada por Rimann (1917). Já Costa & Branco (1961) foram os primeiros a apresentar uma divisão litoestratigráfica, em grande parte adotada até os dias de hoje.

Vários autores (Oliveira, 1967, Braun, 1968; Alvarenga, 1978; Barbosa et al., 1965), propuseram diversas subdivisões estratigráficas para o Grupo Bambuí, porem Dardenne (1978), retomou os pensamentos de Costa & Branco (1961), eliminando a formação Paraopeba e transformando seus membros em formações (Tab. 1) (subdivisão adotada).

Tabela 1 – Diversas subdivisões estratigráficas para o Grupo Bambuí (Nobre-Lopes, 1995).

COSTA E BRANCO (1961)		BARBOSA (1965)	OLIVEIRA (1967)	BRAUN (1968)	DARDENE (1978)	RADAMBRASIL (1982)	
Membro	Formações	Formações	Formações	Formações	Formações		Formações
<b>Serra da Saudade</b>	Paraopeba	Três Marias	Três Marias	Três Marias	<u>Três Marias</u>  Serra da Saudade	Subgrupo Paraopeba	<u>Três Marias</u>
<b>Três Marias</b>							
<b>Lagoa do Jacaré</b>		Lagoa do Jacaré	Lagoa do Jacaré	Paraopeba	Lagoa do Jacaré		Lagoa do Jacaré
<b>Serra de Santa Helena</b>		Serra de Santa Helena	Serra de Santa Helena		Serra de Santa Helena		Serra de Santa Helena
		Sete Lagoas	Sete Lagoas		Sete Lagoas		Sete Lagoas
		Sete Lagoas	Paranoá	Vila Chapada	Paranoá		Jequitaí
	Carrancas	Samburá				Fácies Carrancas	

O grupo Bambuí, esta restrito ao Cráton do São Francisco (CSF) e à Faixa Brasília (FB). Dois macrodômios estruturais são bem descritos por Chang et al., 1988 e Alkmim et al., 1996, o oeste (W) representando por onde houve envolvimento do embasamento na deformação do evento brasileiro (FB) e o leste (E) onde a deformação não atingiu o substrato (CSF).

A idade de deposição do Grupo Bambuí, embora ainda sujeita a controvérsias, é unanimemente admitida como Neoproterozóico. As datações pelos métodos radiométricos K/Ar, Rb/Sr, Razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e Pb/Pb forneceram idades em torno de 850 a 650 Ma para seus sedimentos (Amaral & Kawashita, 1967; Bonhomme, 1976, Kawashita et al. 1987, Chang et al. 1993, Babinski 1993, Nobre-Lopes, 2002, Rodrigues, 2008, Pimentel et al 2011). Os valores mais recentes correspondem, segundo Valeriano (1992), à idade de metamorfismo que afetou os sedimentos Bambuí, durante a deformação e metamorfismo da Faixa Brasília.

O sitio deposicional do Grupo Bambuí é uma bacia de antepaís formada pela colagem do Gondwana Ocidental durante o Neoproterozóico (Alkmim *et al.* 1993, Alkmim e Martins-Neto, 2001).

Feições tectônicas e sedimentares típicas do modelo de antepaís são observadas principalmente em afloramentos, em seções sísmicas ou a partir de métodos de datação e estudos de proveniência, tais como: Vergência tectônica para leste, com cavalgamento e inversão das unidades litoestratigráficas na porção tectonizada da bacia; porção preservada, horizontalizada e embasada pelo CSF; sedimentação pelito-carbonática do tipo rampa, com posterior deposição de sedimentos molássicos em discordância; Proveniência de seus sedimentos, em grande parte, oriundas da FB; Idade de deposição compatível com o desenvolvimento da FB, dentre outras (Alkmim *et al.* 1993, Martins-Neto 2005, 2007, 2009, Chang et al. 1993, Babinski 1993, Nobre-Lopes, 2002, Rodrigues, 2008).

A sedimentação desenvolveu-se numa plataforma do tipo rampa pelito-carbonática capeada por sedimentação molássica na qual Dardenne (1978) considerou 5 unidades formações em conformidade com Costa & Branco (1961),

que são: Formação Sete Lagoas, composta de dolomitos, calcários e pelitos, com estromatólitos bem preservados; Formação Serra de Santa Helena, formada por folhelhos, siltitos e secundariamente arenitos; Formação Lagoa do Jacaré, formada por siltitos, margas e calcários preto oolíticos; Formação Serra da Saudade, composta de folhelhos verdes, siltitos e lentes de calcário (todas referentes a sedimentação pelito-carbonática) e Formação Três Marias, formada de siltitos e arcóseos (referente a sedimentação molássica).

## **4. ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS**

### **4.1. Introdução**

A Estratigrafia de Sequências é o ramo da geologia sedimentar que se desenvolveu de forma aprofundada e específica, a tal ponto que vem se constituindo como um segmento individualizado dentro das geociências (Severiano Ribeiro, 2001). Para Catuneanu (2002) a Estratigrafia de seqüências é “o mais recente e revolucionário modelo de campo da geologia sedimentar”. Na área técnica/industrial é hoje o paradigma máximo para a exploração e exploração de petróleo. Na fase de exploração constitui-se na base conceitual para interpretação e descoberta de campos petrolíferos. Na fase de exploração é fundamental no zoneamento dos reservatórios produtores.

Essa metodologia de empilhamento de rochas foi primeiramente considerada com o advento da estratigrafia sísmica na década de 70. Porém no início da década de 60 Sloss et. al. (1963), já introduzia o termo seqüência em seus trabalhos no estado de Montana - USA. Com essa nova maneira de analisar o subsolo em escala regional foi possível interpretar melhor, fatores como sedimentação, tectônica e eustasia, fatores estes relevantes para a estratigrafia de seqüências.

Em 1977 com o lançamento livro – Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration foi introduzido o conceito de Seqüência Depositional (Vail et.al., 1977), como sendo “uma unidade estratigráfica composta de uma secção relativamente concordante de estratos geneticamente relacionados e limitada, no topo e na base por discordâncias e suas conformidades correlatas” (in Severiano Ribeiro, 2001).

Foram estes trabalhos de Vail et. al. (1977) que consolidaram a moderna estratigrafia de seqüências, mas com a evolução do conhecimento surgiram novos termos e novas maneiras de se pensar. Atualmente Catuneanu et. al (2006; 2009), trouxeram propostas de unificação de todos os termos, a fim de padronizar uma



única nomenclatura estratigráfica, facilitando a comunicação entre os envolvidos com o tema.

## 4.2. Conceitos Fundamentais

### 4.2.1. Terminações Estratais

Os nomes dados as terminações estratais foram definidos a partir da relação geométrica entre os estratos e a superfície sobre a qual eles terminam. São bem observados em larga escala, particularmente em seções sísmicas e em afloramentos grandes (centenas a milhares de metros) (Catuneanu, 2006).

Tais terminações foram idealizadas na década de 70 juntamente com a sismoestratigrafia. A depender de sua terminação e geometria apresentada pode ser chamado de onlap, downlap, offlap, truncamento, toplap (Fig.6). Esses termos foram subsequentemente incorporados a estratigrafia, onde associados aos padrões de empilhamento ajudaram a reconhecer as superfícies estratigráficas e os tratos do sistema.

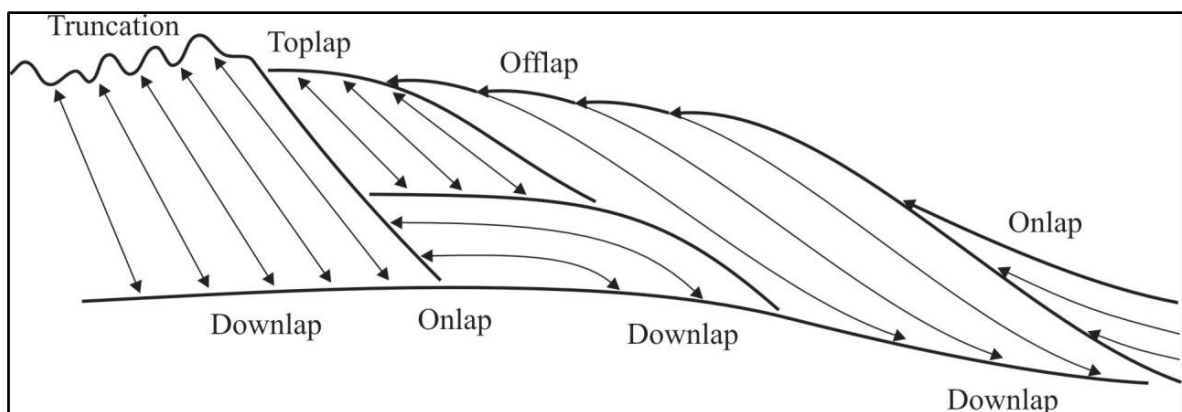


Figura 6 – Modelo esquemático de tipos de terminações estratais associados a uma seção Dip em uma bacia de margem passiva. Catuneanu, 2006.

Essas terminações estratais indicam depósitos associados aos tratos do sistema. Segundo Catuneanu (2006), a terminação em offlap é típica dos deltas de regressão forçada, e o onlap (marinho, costeiro ou fluvial) representa transgressão,

mas o mesmo autor afirma que terminações como as em downlap podem levar a mais de uma interpretação (deltas de regressão normal ou forçada).

#### 4.2.2. Nível de base e Acomodação

O nível de base é toda superfície de equilíbrio imaginária entre a deposição e a erosão. Depende basicamente da energia do sistema e do suprimento sedimentar (Catuneanu, 2006).

Em ambientes eólicos o nível de base é a superfície do topo do lençol freático, pois quando esse nível é atingido os ventos não conseguem mobilizar os sedimentos disponíveis.

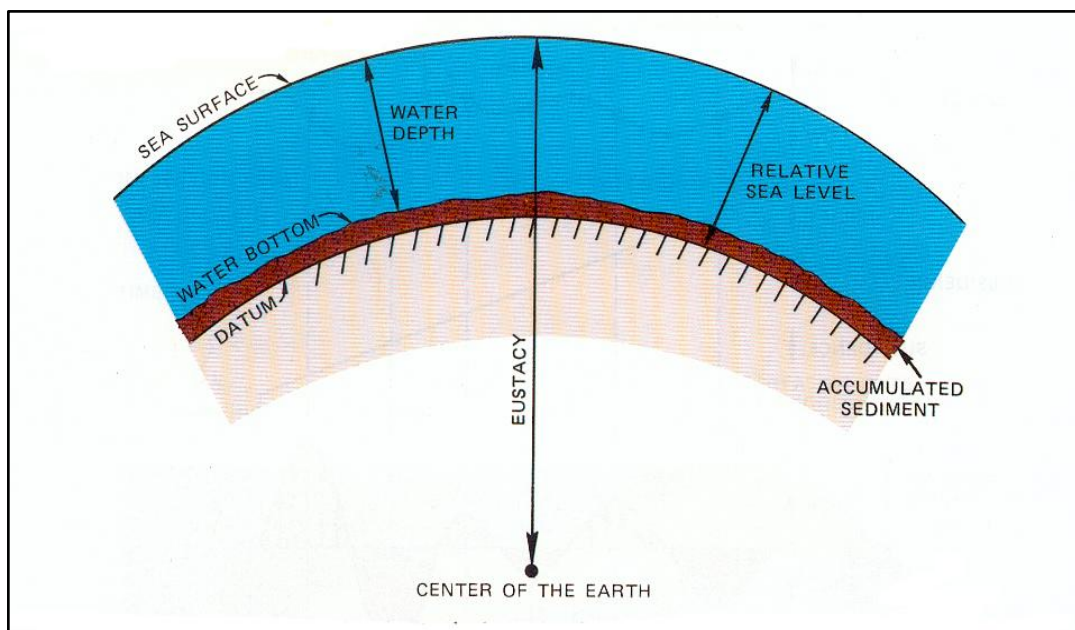


Figura 7 – Figura esquemática demonstrando a relação entre nível do mar, nível eustático e espaço disponível e utilizado para acumulação de sedimentos. Posamentier et al, 1988.

Acomodação é definida por Jervey (1988, in Severiano Ribeiro, 2001) como “todo espaço colocado em disponibilidade para potencial acumulação de sedimentos”, sendo função principalmente das flutuações eustáticas e da subsidência tectônica (Fig.7). Existem casos em que o aporte sedimentar e a energia do sistema (marés, ondas, rios e ventos) são fatores controladores para a

acomodação. A relação entre aporte sedimentar e espaço de acomodação gera trends nos padrões de empilhamento (progradacional, retrogradacional e agradacional).

O nível de base marinho é a própria superfície do oceano, considerado como nível de base global. Já os rios têm como nível de base o perfil de equilíbrio fluvial, que depende de fatores como tectonismo, clima e variações no nível do mar (Catuneanu, 2006). Em um contexto de soerguimento tectônico, o perfil de equilíbrio fluvial fará com que os rios entalhem ao máximo seus talwegues, devido à alta energia de fluxo.

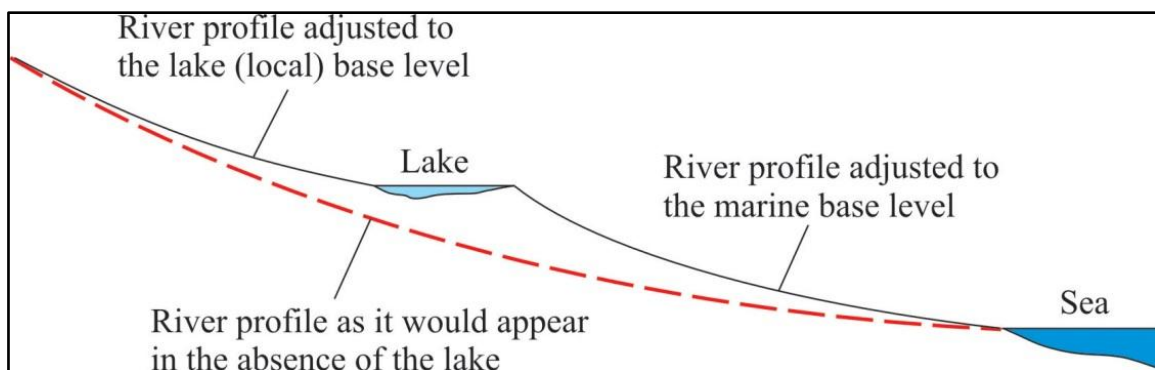


Figura 8 – Perfil de equilíbrio fluvial esquemático (vermelho) e o reajuste sofrido pela presença de lago antes do rio desaguar no oceano. Catuneanu, 2006.

É comum também que o perfil de equilíbrio fluvial sofra deflexões, se ajustando a um corpo aquoso continental (Fig.8). Isso se deve a desaceleração que ocorre com a energia de fluxo do rio e consequente deposição de sedimentos no corpo d'água.

#### 4.2.3. Transgressão – Regressão

De acordo com a Fig.9 é possível observar a relação entre curva de variação do nível de base com a taxa de variação do nível de base a uma taxa de sedimentação constante.

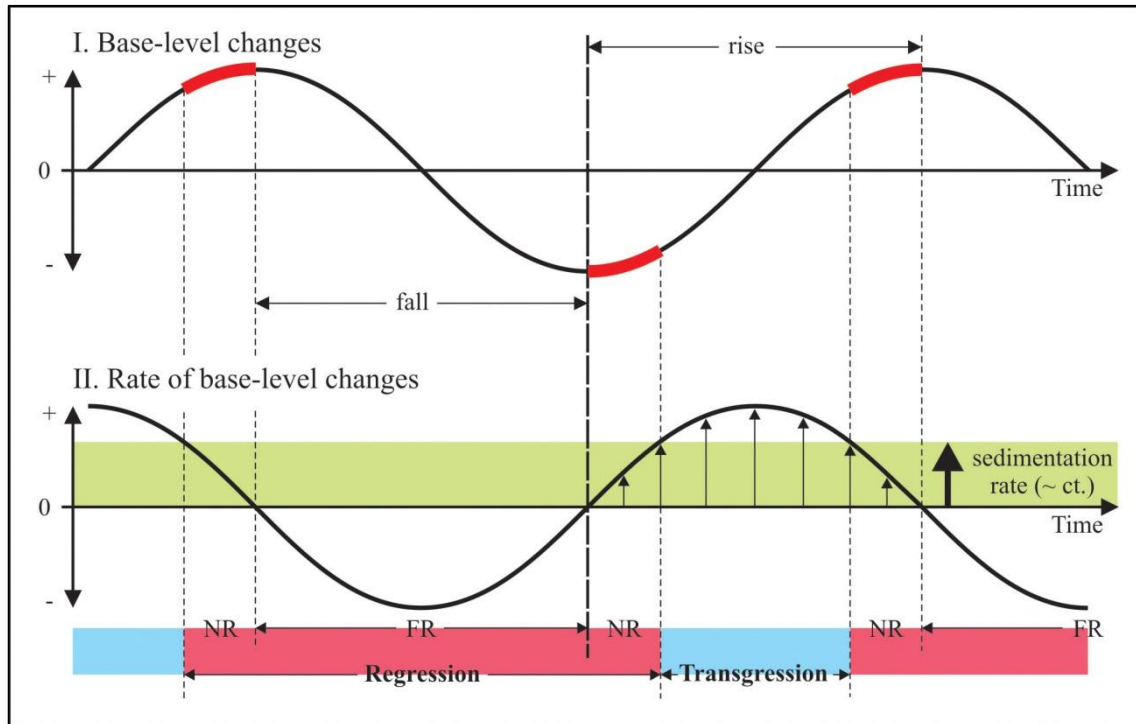


Figura 9 – Curva de variação do nível de base e de taxa de variação do nível de base com a taxa de sedimentação constante. Catuneanu, 2006.

Partindo do patamar mínimo alcançado pelo nível de base, tem-se um momento de subida em que as fácies costeiras adentram o oceano devido a maior taxa de sedimentação em relação a taxa de subida do nível de base, caracterizando uma regressão normal. Nesse contexto a progradação vai diminuindo à medida que se aumenta a taxa de subida no nível de base.

Após a fase anterior a taxa de subida do nível de base excede a de sedimentação e as fácies continentais e marinhas migram em direção ao continente em onlap. Esse momento na curva eustática é caracterizado como transgressão. A curva de taxas de mudanças no nível de base chega ao máximo e cai. Quando a taxa de sedimentação excede a de subida do nível de base ocorre nova regressão normal. Nesse contexto a progradação aumenta à medida que se tem a diminuição da taxa de subida do nível de base.

O restante da curva de variação do nível de base é preenchido pelo momento de queda. Nesse contexto se forma a regressão forçada, momento em que a taxa de queda do nível de base excede a de sedimentação.

#### 4.2.4. Progradação – Retrogradação – Agradação

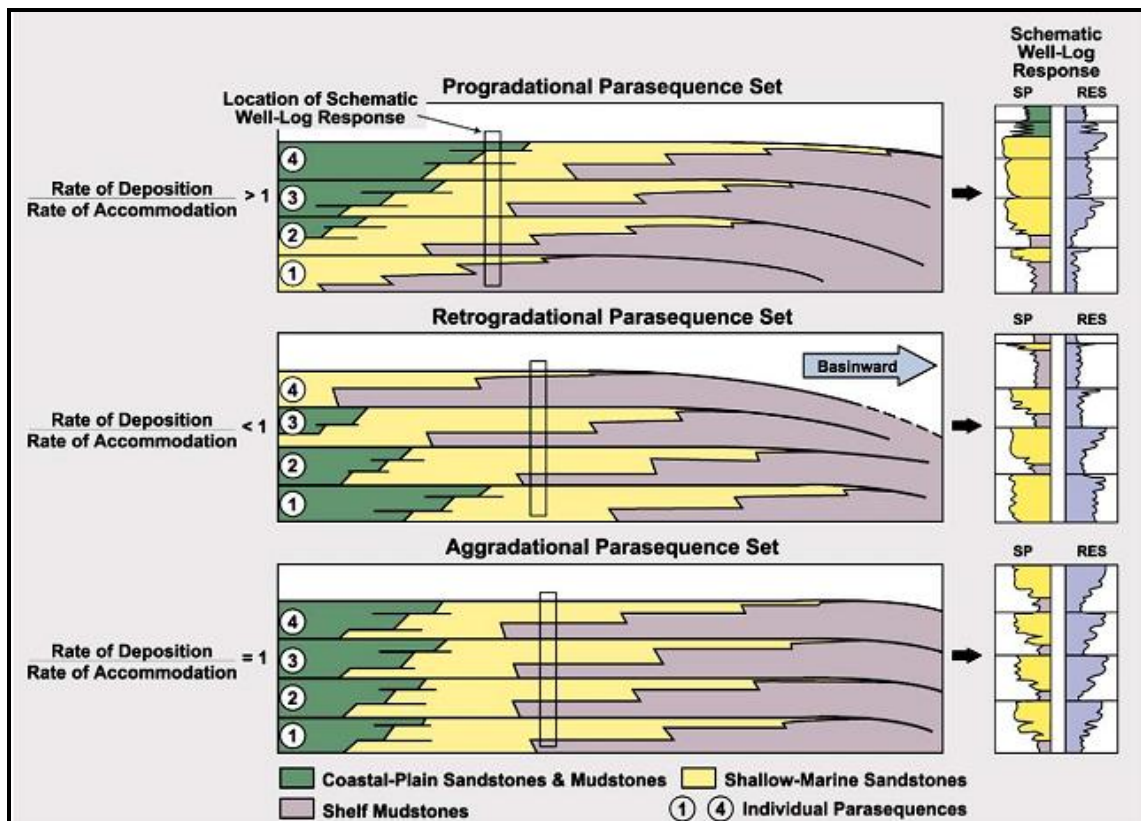


Figura 10 – Padrões progradacionais, retrogradacionais e agradacionais com seus respectivos empilhamentos verticais típicos. Van Wagoner et al., (1990).

O sentido da migração da linha de costa faz os sedimentos empilharem-se de formas específicas a depender da razão entre a taxa de sedimentação (D) e a taxa de acomodação (A).

Se essa razão obtiver valores positivos ( $D/A > 1$ ) o sistema prograda, ou seja, as fácies continentais se sobrepõem sobre as fácies marinhas, com trends granocrescente ascendente e estrato-crescente ascendente (fig.10).

Se essa razão obtiver valores negativos ( $D/A < 1$ ) o sistema tende a retrogradar, ou seja, a fácies marinha se sobrepõe sobre as fácies continentais, com trends granodecrescente ascendente e estrato-decrescente ascendente (fig.10).

Com os padrões estáveis ( $D/A = 1$ ) o sistema agrada. Os perfis verticais apresentam trends estanques. A movimentação da linha de costa é quase nula (Fig.10).

Associado a outros fatores é possível identificar superfícies, interpretar mudanças de tratos de sistemas e especular sobre a relação entre taxa de sedimentação e taxa de variação do nível de base. Com isso a identificação do padrão de empilhamento (progradacional, retrogradacional e agradacional) é fundamental para a construção de modelos estratigráficos.

### **4.3. Tipos de Sequências Estratigráficas**

A sequência é a unidade fundamental para estratigrafia de sequência, mas existem três modelos para a mesma. Os pensamentos de Vail et. al., 1977 revolucionaram a estratigrafia, porém inúmeras escolas de ideias distintas se desenvolveram ao longo das décadas subsequentes, o que gerou os modelos distintos para as sequências idealizadas por Sloss na década de 60.

Segundo Catuneanu, 2009 uma sucessão de estratos depositados durante um ciclo completo de mudança na acomodação e/ou suprimento sedimentar é denominado de sequência estratigráfica. Os três tipos de sequências estratigráficas (Sequência Depositional, Sequência Transgressiva-Regressiva, Sequência Estratigráfica Genética) tem peculiaridades inerentes a cada uma, que faz sua aplicação depender da base de dados com que se quer trabalhar

#### **4.3.1. Sequência Depositional**

Nesse tipo de sequência, idealizado inicialmente por Vail et al., 1977 e adaptada por Posamentier et al., 1988 e Hunte & Tucker, 1992, os limites entre as sequências são representados por discordância subaérea e suas conformidades correlatas. O fatiamento estratigráfico é de muito detalhe. Um ciclo completo é representado por 4 tratos do sistema, que são: estágio de queda, mar baixo, transgressivo e mar alto.

Esse modelo é o mais aplicado para depósitos siliciclásticos em que se tem vasto acervo de dados (testemunho, perfilagem, afloramentos, sísmica etc.). A aplicação somente com dados de poço é restrita, pois as mudanças importantes da bacia são melhor notadas em escala regional.

#### 4.3.2. Sequência Transgressiva-Regressiva (T-R)

As sequências T-R (Embry & Johannessen, 1992) são limitadas por discordâncias subaéreas, próximo à costa, passando a máxima regressiva em direção ao depocentro da bacia (Fig.11).

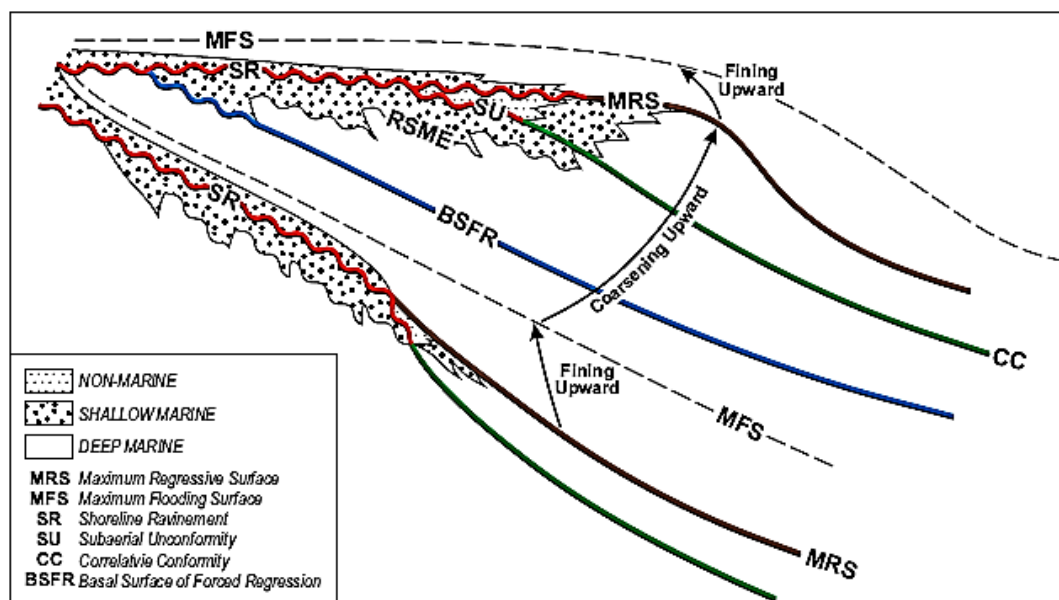


Figura 11 – Modelo de sequência estratigráfica Transgressiva-Regressiva (Embry & Johannessen, 1992).

Esse tipo de sequência é mais utilizado para correlação de poços e situações onde existem poucos dados disponíveis, pois dentre as sequências estratigráficas é a mais simples de se marcar o limite entre seus dois únicos tratos do sistema (transgressivo e regressivo). Mudanças marcantes nos padrões deposicionais (progradação e retrogradação) são os principais critérios para individualizar os tratos do sistema, devido à amalgamação dos três tratos regressivos (estágio de queda, mar baixo e mar alto) em um único.



### 4.3.3. Sequência Estratigráfica Genética

A Sequência Estratigráfica Genética (Galloway, 1989), é muito similar a Sequência Depositional. A Principal diferença entre esses dois tipos de sequência é o limite, que no caso das sequências genéticas é a Superfície de Inundação Máxima – SIM.

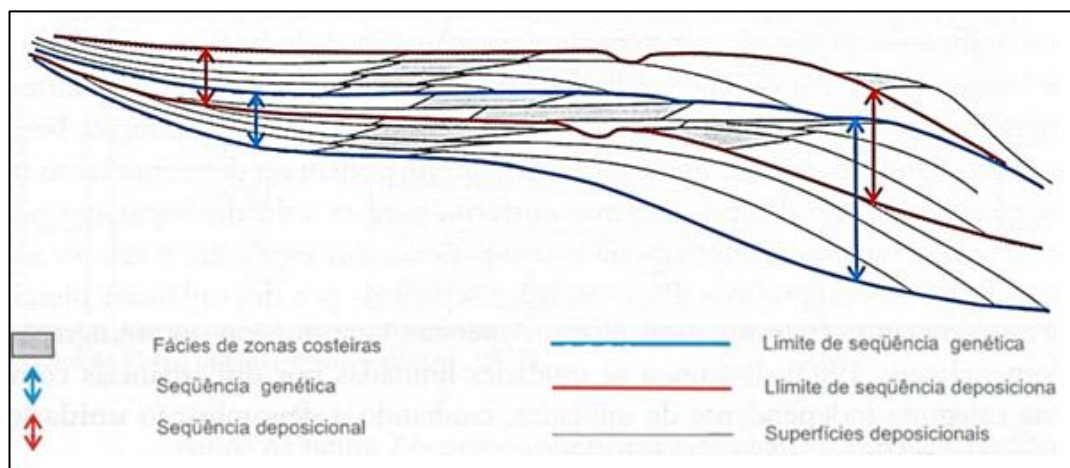


Figura 12 – Modelo esquemático de uma sequência estratigráfica hipotética, com a interpretação das sequências genética (Limites em azul) e deposicional (limites em vermelho). Notar que dentro da sequência genética há uma discordância.

Um grande problema discutido para esse tipo de sequência, é que ela abriga internamente uma discordância (Fig.12), fato de discórdia para muitos estatígrafos. Para Galloway, 1989 o verdadeiro fator controlador dos depósitos sedimentares são as forças tectônicas, fato que faz esse autor limitar as sequências genéticas por uma SIM. Já os outros dois tipos de sequências estratigráficas têm como fator controlador as variações eustáticas.



## 5. GEOQUÍMICA ISOTÓPICA (C, O e Sr)

Os dados de geoquímica isotópica (associado à litogeoquímica) no estudo dos carbonatos proterozóicos são de grande importância, visto que, uma vasta bibliografia pode ser encontrada sobre esse tema, facilitando a determinação de idades relativas para as sequências sedimentares (Knoll & Walter 1992, Kaufman & Knoll 1995, Veizer et al. 1999, Jacobsen & Kaufman 1999, Aharon, 2005). Associando esses dados com um controle estratigráfico consistente (coleta de amostras obedecendo a estratigrafia) são obtidos dados quimioestratigráficos, onde é possível observar as variações isotópicas que ocorrem ao longo de uma sequência sedimentar.

Dentre os resultados obtidos com a técnica, destacam-se aqueles que oferecem parâmetros a respeito das condições ambientais à época de sedimentação, obtidos principalmente através da quimioestratigrafia isotópica de C, O e Sr. No caso dos carbonatos Proterozóicos, estes estudos adquirem especial importância devido à escassez de fósseis e ao insucesso dos estromatólitos como recurso bioestratigráfico.

### 5.1. Isótopos Estáveis

Os Isótopos estáveis são variações no número de massa de certos elementos (C, O, N, H, Fe, S, principalmente). Essas variações fazem com que tais elementos tenham mais de um representante na sua “família” (ex. Oxigênio tem 3 integrantes  $^{18}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$ ), onde o representante de menor número de massa na maioria dos casos (ex.  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^1\text{H}$  etc.), perfaz a grande maioria (acima de 95%). Para o estudo dos carbonatos do Grupo Bambuí o maior acervo de dados vem dos isótopos de C e O.

No estudo isotópico de C e O são utilizadas as razões entre os isótopos estáveis  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  comparadas com um padrão, para se chegar a unidade específica  $\delta$ , que passa a ser o valor utilizado para as comparações e correlações. O

padrão mais usado é o PDB (Pee Dee Belemnite), que corresponde à razão isotópica de uma concha de Belemnite de idade cretácea da Formação Pee Dee (Carolina do Sul, Estados Unidos). Se o valor de delta é positivo indica que a amostra é enriquecida em isótopos pesados e se o valor de delta é negativo a amostra é empobrecida. Assim, tem-se que:

$$\delta^{18}O = \left[ \frac{{}^{18}O/{}^{16}O(\text{amostra}) - {}^{18}O/{}^{16}O(\text{padrão})}{{}^{18}O/{}^{16}O(\text{padrão})} \right] 10^3 \quad \text{e} \quad \delta^{13}C = \left[ \frac{{}^{13}C/{}^{12}C(\text{amostra}) - {}^{13}C/{}^{12}C(\text{padrão})}{{}^{13}C/{}^{12}C(\text{padrão})} \right] 10^3$$

Sendo os valores finais representados em partes por mil (‰).

### 5.1.1. Isótopos de Oxigênio

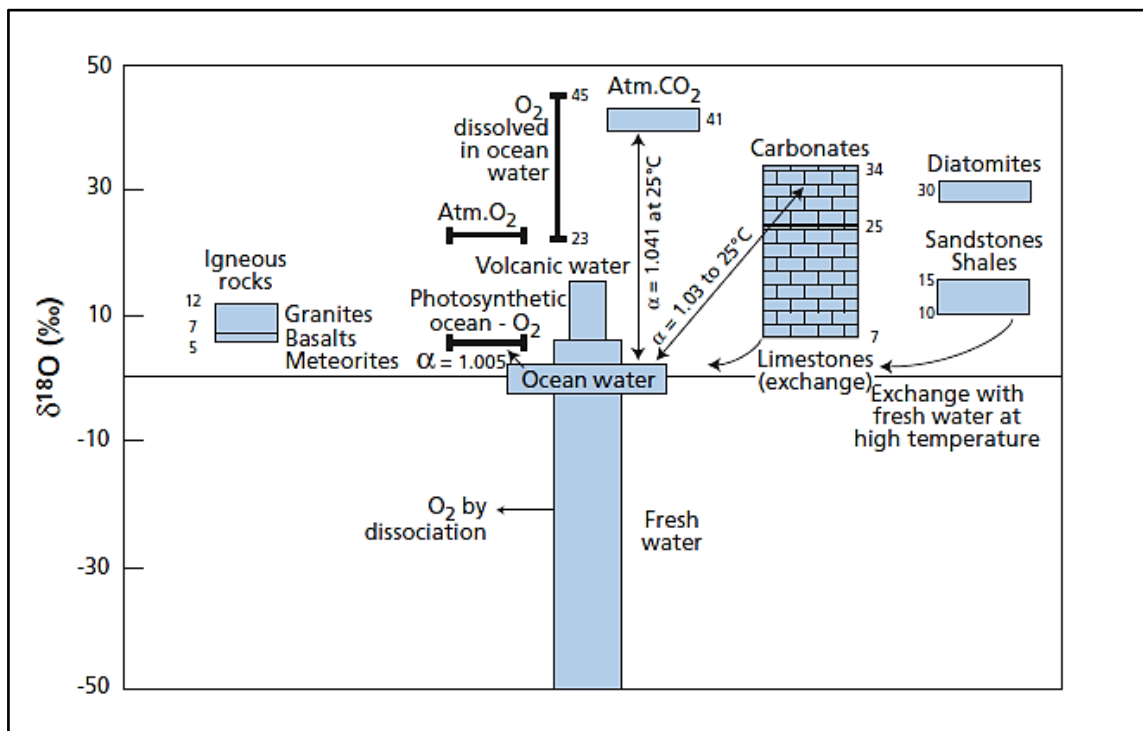


Figura 13 – Gráfico apresentando os teores médios de  $\delta^{18}O$  para algumas substâncias terrestres (Allegre, 2008).

O oxigênio é representado na natureza por três isótopos ( $^{18}O$ ,  $^{17}O$  e  $^{16}O$ ), sendo que o  $^{16}O$  perfaz mais de 99% do total. Normalmente é estudada a razão  $^{18}O/^{16}O$ , visto que o  $\delta^{18}O$  da água do mar é igual a zero (Fig.13).

Rochas ígneas e metamórficas apresentam o  $\delta^{18}\text{O}$  positivo variando de +5 a +13. Carbonatos são na média enriquecidos em  $\delta^{18}\text{O}$  (+7 a +35). Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  negativos são atingidos pela água doce (abaixo de -5) (Fig.13).

Dentre os mecanismos responsáveis pelo fracionamento isotópico do oxigênio destaca-se a evaporação da água. Durante o processo, o vapor é enriquecido em  $^{16}\text{O}$ , causando um enriquecimento relativo em  $^{18}\text{O}$  na água do mar remanescente, e elevando assim seu  $\delta^{18}\text{O}$ . Consequentemente os carbonatos formados posteriormente são enriquecidos em  $\delta^{18}\text{O}$ .

Assim, alterações nos fatores naturais relacionados à evaporação (temperatura, insolação, salinidade, restrição do corpo d'água, glaciações etc.) poderiam causar variações nas razões  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  da água do mar e, conseqüentemente, dos depósitos carbonáticos gerados (Corfield 1994, Allan & Matthews 1982, Thunell et al. 1987).

### 5.1.2. Isótopos de Carbono

Os isótopos estáveis de Carbono têm número de massa 12 e 13, sendo que o  $^{12}\text{C}$  representa mais de que 98% do total. Porém existem membros que são radiogênicos, apresentando meia vida, como é o caso do  $^{14}\text{C}$  que não sofre fracionamento e sim decaimento.

O principal mecanismo responsável pelo fracionamento isotópico do carbono estável é a produção de matéria orgânica, que ocorre principalmente através da fotossíntese. Neste processo é utilizado preferencialmente o  $^{12}\text{C}$ , o que causa um enriquecimento relativo do meio (ex. água do mar) em  $^{13}\text{C}$  e, portanto, uma elevação dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (Schidlowski et al. 1983). Assim, num ambiente marinho com intensa atividade biológica, os valores  $\delta^{13}\text{C}$  são bastante positivos na água do mar, o que fica registrado nos carbonatos precipitados a partir dela. Contudo, se a atividade biológica é muito baixa ou inexistente, o meio aquático apresentará valores de  $\delta^{13}\text{C}$  negativos, bem como os carbonatos ali precipitados. Vale lembrar, que o aporte de

água fluvial também eleva os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  da água do mar e o aumento da salinidade tende para valores negativos.

O isótopo de C é o mais utilizado para posicionamento geocronológico das sequências carbonáticas Neoproterozóicas. Isso se deve ao fato de algumas de suas rochas terem registrado por toda a terra, momentos com anomalias negativas de  $\delta^{13}\text{C}$ , por conta das glaciações Esturtiana e Marinoana (*Snowball Earth*). As rochas formadas logo após os depósitos glaciais são ditas carbonatos de capa, que além da anomalia negativa em  $\delta^{13}\text{C}$  podem apresentar características sedimentológicas marcantes (mega marcas onduladas e aragonita em leque etc).

Considerando esses eventos e outros fatos marcantes, como um aumento gradacional nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre os dois principais eventos glaciais do Neoproterozóico, diversos autores (Knoll & Walter 1992, Kaufman & Knoll 1995, Veizer et al. 1999, Jacobsen & Kaufman 1999, Aharon, 2005), propuseram curvas  $\delta^{13}\text{C}$  (Figura 14), com boa resposta no Grupo Bambuí (Santos et al. 2000, Misi 2001, Martins & Lemos 2007, Zalán & Romeiro-Silva, 2007, Alvarenga et al., 2007).

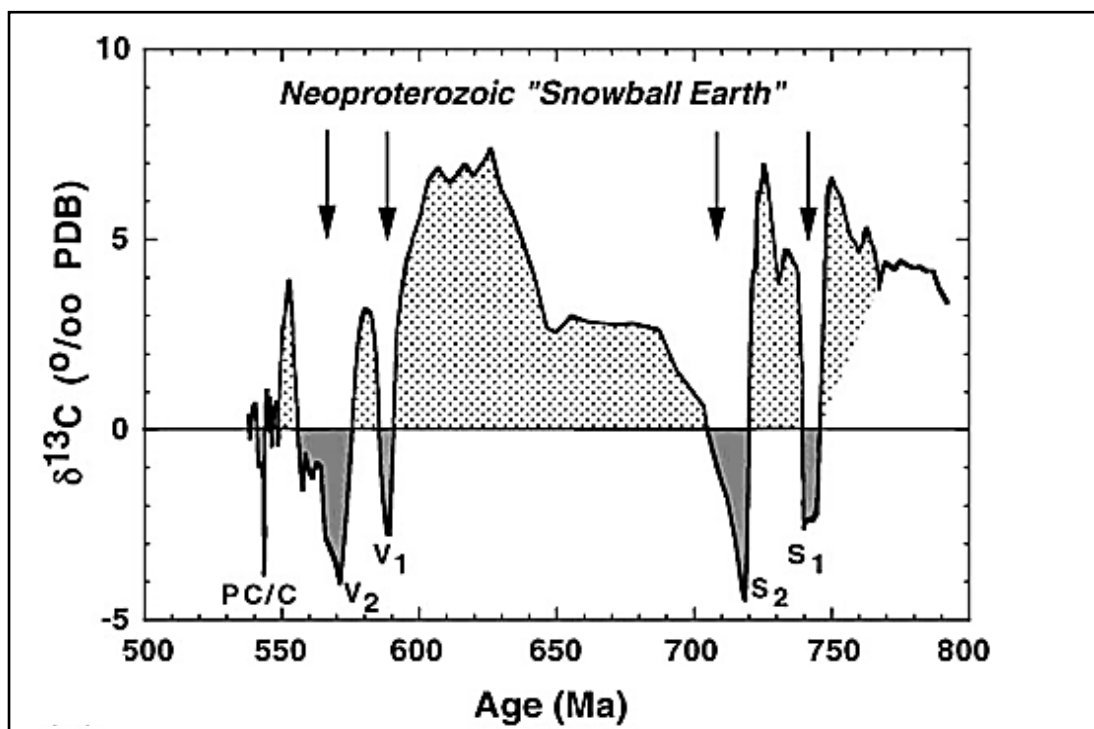


Figura 14 - Curva com evolução do  $\delta^{13}\text{C}$  no Neoproterozóico. As siglas S1 e S2 são referentes às incursões glaciais Esturtianas e V1 e V2 Marinoanas. PC/C passagem do cambriano para o pré-cambriano. Aharon, 2005.

## 5.2. Isótopos Radiogênicos - Sr

Os isótopos radiogênicos se caracterizam por apresentar um núcleo atômico instável que emite energia quando se transforma num isótopo mais estável. A energia liberada na transformação é chamada de Partícula alfa, Partícula beta ou Radiação gama. Dentre uma gama de elementos ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ , etc.) existentes na terra, utilizados nos métodos de datação geocronológica, destaca-se o Sr, através da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , no estudo de carbonatos Neoproterozóicos.

O estrôncio tem quatro isótopos naturais estáveis: Sr-84 (0,56%), Sr-86 (9,86%), Sr-87 (7,0%) e Sr-88 (82,58%). Somente o isótopo Sr-87 é radioativo, produto da desintegração do rubídio-87. Portanto, o Sr-87 pode ter duas origens: formado durante a síntese nuclear primordial (junto com os outros três isótopos estáveis) e formado pelo decaimento do rubídio. A razão Sr-87/Sr-86 é o parâmetro tipicamente utilizado na datação radiométrica da investigação geológica, encontrando-se valores entre 0,7 e 4,0 em diferentes minerais e rochas.

Vários processos geológicos podem influenciar a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , a exemplo da atividade hidrotermal nas cadeias meso-oceânicas (Jones et al. 1994) e da diagênese (Baker et al. 1982). No entanto, a relação direta desta razão com o Rb, elemento essencialmente litófilo, faz com que a taxa de intemperismo/erosão assumam especial importância nesse aspecto. Assim, todos os fatores naturais que, direta ou indiretamente, controlam o ciclo sedimentar podem influenciar de maneira significativa a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Dentre os principais, destacam-se as mudanças climáticas (especialmente as glaciações), processos orogênicos e grandes variações no nível do mar (Banner 2004). Outros fatores, como o impacto de meteoros (Martin & McDougall 1991) e mudanças no padrão de circulação dos oceanos também poderiam influenciar a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Curvas globais de variação temporal (Fig.15) também foram propostas por diferentes autores, a princípio para o Fanerozóico (Burke et al. 1982) e posteriormente para todo Paleozóico e final do Proterozóico (e.g. Hoffman et al. 1998, Melezhik et al. 2001, Halverson et al. 2007).

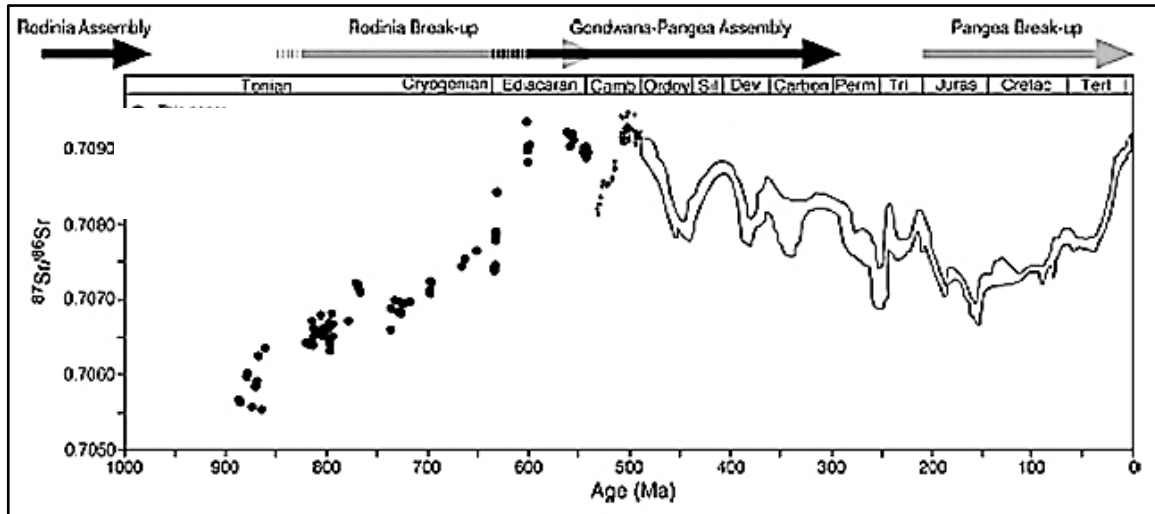


Figura 15 - Curva com evolução da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  a partir da assembleia do supercontinente Rodínia ate o presente (Halverson et al. 2007).

## **6. ARTIGO a ser submetido para publicação - O Grupo Bambuí a leste da falha de São Domingos: Um registro da exposição subaérea dos carbonatos Neoproterozóicos.**

### **6.2. Introdução**

Depois dos trabalhos de Alvarenga e Dardenne (1978) e Dardenne (1978) no extremo norte do estado de Minas Gerais (Serra de São Domingos), diversos autores vêm utilizando tais dados do Grupo Bambuí para comparações em escala de bacia (Santos et al. 2000, Misi 2001, Martins & Lemos 2007, Zalán & Romeiro-Silva, 2007 etc.).

Devido ao fato da região abrigar exsudações naturais de gás, houve uma intensa procura por hidrocarbonetos na região. Levantamentos sísmicos 2D e alguns poços foram perfurados pela PETROBRAS. Grande parte das informações utilizadas nas correlações dos autores supracitados vem desses poços (testemunhados ou não), realizados para a exploração de petróleo. A difusão de dados de sísmica 2D também facilitaram na identificação de superfícies estratigráficas marcantes, individualizando sequencias sedimentares dentro do grupo Bambuí (Martins & Lemos 2007, Viera et. al 2007, Martins-Neto 2009).

Além dos estudos que envolvem a indústria do petróleo, as universidades brasileiras vêm ao longo das ultimas décadas criando um vasto acervo de dados geoquímicos, principalmente das porções carbonáticas do grupo Bambuí. A geoquímica isotópica (C, O, e razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) tem papel importante nas interpretações de cunho regional. Um vasto acervo de dados de isótopos de C existe na bibliografia relacionada, quando comparamos os dados de isótopos de C obtidos nos carbonatos do grupo Bambuí, com dados de bacias da mesma idade ao redor do mundo, se obtém valores coerentes para uma evolução global similar para o planeta Terra nesse período (Santos et al. 2000, Misi 2001, Martins & Lemos 2007, Zalán & Romeiro-Silva, 2007, Alvarenga et. al. 2007). Essa evolução marcada nas rochas mostra um momento de opostos, pois depósitos glaciais são sobrepostos por carbonatos plataformais de clima quente. Na passagem dos depósitos glaciais para os carbonatos ocorrem rochas híbridas, chamadas de carbonatos de capa (carbonatos de clima frio), que são negativamente anômalos em  $\delta^{13}\text{C}$ .

### 6.3. Geologia Regional

A deposição do Grupo Bambuí ocorreu em uma bacia de antepaís, formada pela colagem do Gondwana Ocidental durante o Neoproterozóico (Alkmim et al. 1993, Alkmim e Martins-Neto, 2001).

Feições tectônicas e sedimentares típicas do modelo de antepaís são observadas principalmente em afloramentos, em seções sísmicas ou a partir de métodos de datação e estudos de proveniência, tais como: Vergência tectônica para leste, com cavalgamento e inversão das unidades litoestratigráficas na porção tectonizada da bacia; Porção preservada, horizontalizada e embasada pelo Cráton do São Francisco; Sedimentação pelito-carbonática do tipo rampa, com posterior deposição de sedimentos molássicos em discordância; Proveniência de seus sedimentos, em grande parte, oriundas da Faixa Brasília; Idade de deposição compatível com o desenvolvimento da Faixa Brasília, dentre outras (Alkmim et al. 1993, Martins-Neto 2005, 2007, 2009, Chang et al. 1993, Babinski 1993, Nobre-Lopes, 2002, Rodrigues, 2008, Pimentel et al. 2011).

A bacia precursora do Grupo Bambuí esta restrita ao cráton do São Francisco (CSF) e a Faixa Brasília (FB). Dois macrodomínios estruturais são bem descritos por Chang et al. (1988) e Alkmim et al. (1996), para o norte de Minas Gerais (área de trabalho), que são: o oeste (W) representando por onde houve envolvimento do embasamento na deformação (FB) e o leste (E) onde a deformação não atingiu o substrato (CSF). Porém vale lembrar-se da influência tectônica exercida pelas faixas Araçuaí e Rio Preto, sem grandes influências na região.

A sedimentação desenvolveu-se numa plataforma do tipo rampa pelito-carbonática capeada por sedimentação molássica (Barbosa, 1965) na qual Dardenne (1978) individualizou seis formações (tab. 1) baseado nos trabalhos de Costa & Branco (1961), a saber: Formação Jequitaí, composta por pelitos e diamictitos (referentes a deposição glacial); Formação Sete Lagoas, composta de dolomitos, calcários e pelitos, com estromatólitos bem preservados; Formação Serra de Santa Helena, formada por folhelhos, siltitos e secundariamente arenitos; Formação Lagoa do Jacaré, formada por siltitos, margas e calcários pretos oolíticos; Formação Serra da Saudade, composta de folhelhos verdes, siltitos e lentes de



calcário (todas referentes à sedimentação pelito-carbonática) e Formação Três Marias, formada de siltitos e arcóseos (referente à sedimentação molássica). Vale lembrar-se da carência de um marco bioestratigráfico e a pouca atividade microbiana na bacia, restringindo-se a bioestruturas estromatolíticas na base do grupo.

A área de estudo está no município de Formoso-MG, e no limite entre os compartimentos E e W, sendo a feição tectônica que marca a passagem da zona externa da FB para o CSF representada pelo sistema de falhas de São Domingos (Alvarenga, 1978) (Fig. 1). A área em questão dista cerca de 50 km do poço 1-RC-01-GO, que inclui registro completo da descrição das unidades basais do Grupo Bambuí a leste da falha de São Domingos.

Tabela 1 – Formações e principais litologias do grupo Bambuí.

<b>Grupo</b>	<b>Formação</b>	<b>Litologia</b>
<b>Bambuí</b>	Três Marias	siltitos e arcóseos
	Serra da Saudade	folhelhos verdes, siltitos e lentes de calcário
	Lagoa do Jacaré	siltitos, margas e calcários preto oolíticos
	Serra de Santa Helena	folhelhos, siltitos e secundariamente arenitos muito fino
	Sete Lagoas	dolomitos, calcários e pelitos, com níveis estromatolítico
	Jequitaiá	pelitos e diamictitos

Os dados obtidos do poço 1-RC-01-GO (Fig. 2), principalmente de Clark & Fugita (2001), Misi (2001), Tonietto (2010), Martins (1999), Martins & Lemos (2007), foram utilizados para as correlações estratigráficas com a seção do Ribeirão Caldeira - SRC. A descrição faciológica e as interpretações com base na moderna estratigrafia de sequências, aliado a dados isotópicos (C, O e Sr) e geoquímica, auxiliaram nas correlações e discussões para a evolução do Grupo Bambuí na área estudada

# Mapa Geológico Regional

## Legenda

### Litologias

- Tercio Quaternário Detritico
- Formação Urucuia
- Grupo Bambuí: Formação Três Marias
- Grupo Bambuí: Formações Sete lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade
- Grupo Paranoá

### Convenções Cartográficas

- SRC - Seção Ribeirão Caldeira
- Poço 1-RC-01-GO
- Cidades
- Rodovias
- Drenagens
- Falhas e lineamentos
- Falhas de São Domingos

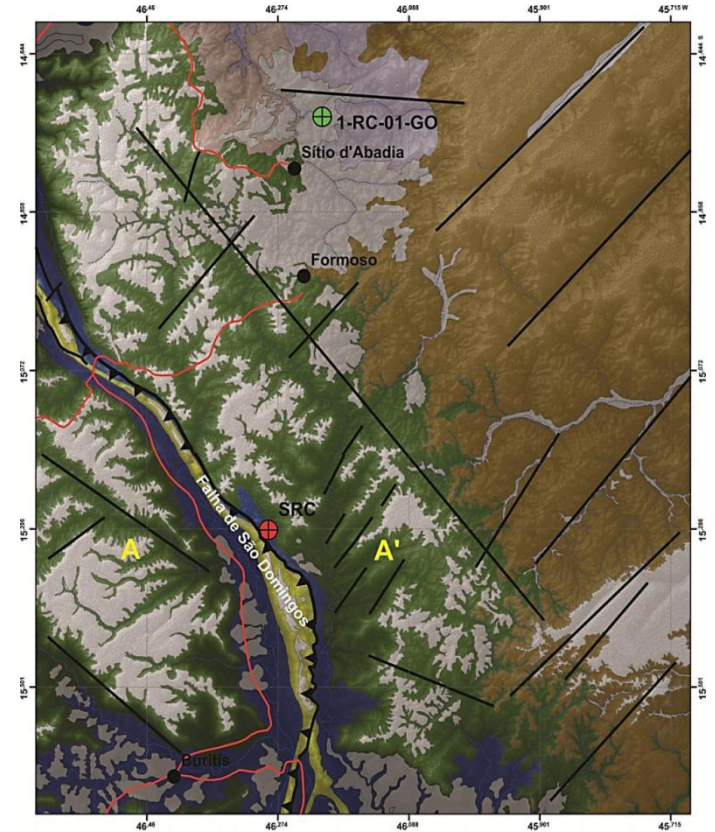
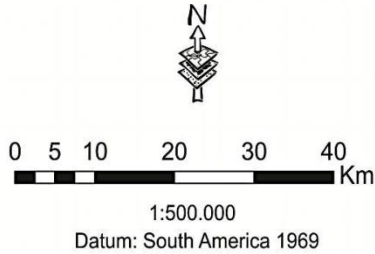
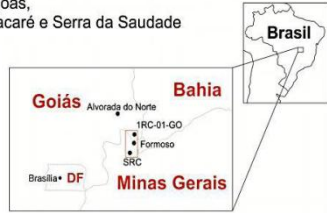


Figura 1 – Mapa Geológico regional simplificado da área de estudo, contemplando a SRC, o poço 1-RC-01-GO, além do sistema de falhas de São Domingos, limite entre o Cráton do São Francisco - CSF e a Faixa Brasília - FB. (A – A’) localização as Seção Estrutural (compilado a partir de CPRM, 2011).

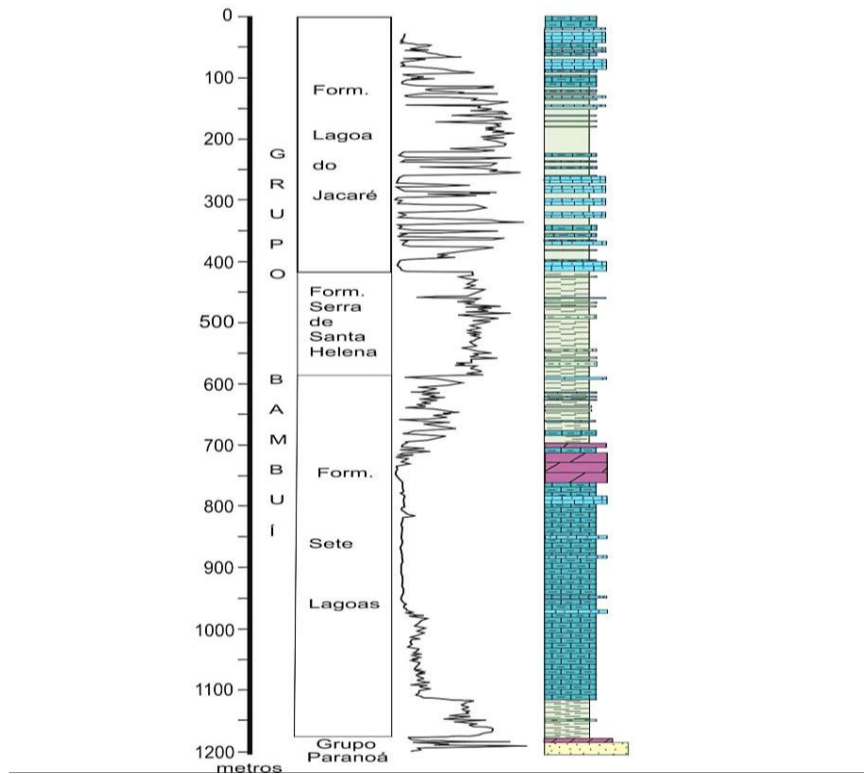


Figura 2 – Litologia e Raio Gama do poço 1-RC-01-GO (Clark e Fugita, 2001).

#### 6.4. Geologia da Serra de São Domingos

A formação Sete Lagoas a leste da falha de São Domingos é carente em afloramentos, porém a sua descrição completa na região é encontrada no poço exploratório 1-RC-01-GO (Fig. 2).

Nesse artigo são apresentadas interpretações estratigráficas, dados geoquímicos e isotópicos de uma seção aflorante que contem as unidades basais do grupo Bambuí, a leste da serra de São Domingos. A seção esta localizada ao longo do Ribeirão Caldeira, norte de Minas Gerais (Fig. 1).

Inúmeros são os interesses para o entendimento estratigráfico da região, dentre eles, vale destacar a crescente busca por Hidrocarbonetos e rochas fosfáticas, além do interesse acadêmico.

A estratigrafia é diferenciada para as porções oeste e leste da falha de São Domingos (Fig. 3). Na porção leste, o grupo Bambuí tem os seus primeiros afloramentos a partir da falha. Na seção do Rio Caldeira a falha limita os dolomitos estromatolíticos da base do grupo Paranoá, com os calcários argilosos da formação Sete Lagoas do grupo Bambuí.

O grupo Bambuí na porção leste se inicia com calcários laminados, dolomitos, pelitos intercalados com calcarenitos e calcirruditos da formação Sete Lagoas. Continuando a estratigrafia pelitos intercalados com quartzitos finos da formação Serra de Santa Helena que logo passam para calcarenitos oolíticos e pelitos calcíferos da formação Lagoa do Jacaré finalizam os carbonatos da seção. Em seguida pelitos negros na formação Serra da Saudade e intercalação de pelitos com arenitos arcóseos da formação Três Marias, são descritos à medida que as camadas ficam horizontalizadas

As litologias encontradas logo a leste da falha de São Domingos (área de trabalho) são de fácil correlação com as encontrados no Poço 1-RC-01-GO (Fig. 1). Considerando as fácies, associação de fácies, a petrografia e o empilhamento estratigráfico, foi possível estabelecer a correlação entre a seção levantada no ribeirão Caldeira, com a do poço 1-RC-01-GO. As descrições de Tonietto (2010), com seu rico acervo de fotomicrografias, além de trabalhos de Clark & Fugita (2001),

Santos et al. (2000), Misi (2001), Martins & Lemos (2007), Zalán & Romeiro-Silva (2007), abordando mais o caráter evolutivo do Grupo Bambuí, auxiliaram nessa correlação.

*Confronto entre as estratigrafias do grupo Bambuí no oeste e no Leste da falha de São Domingos.*

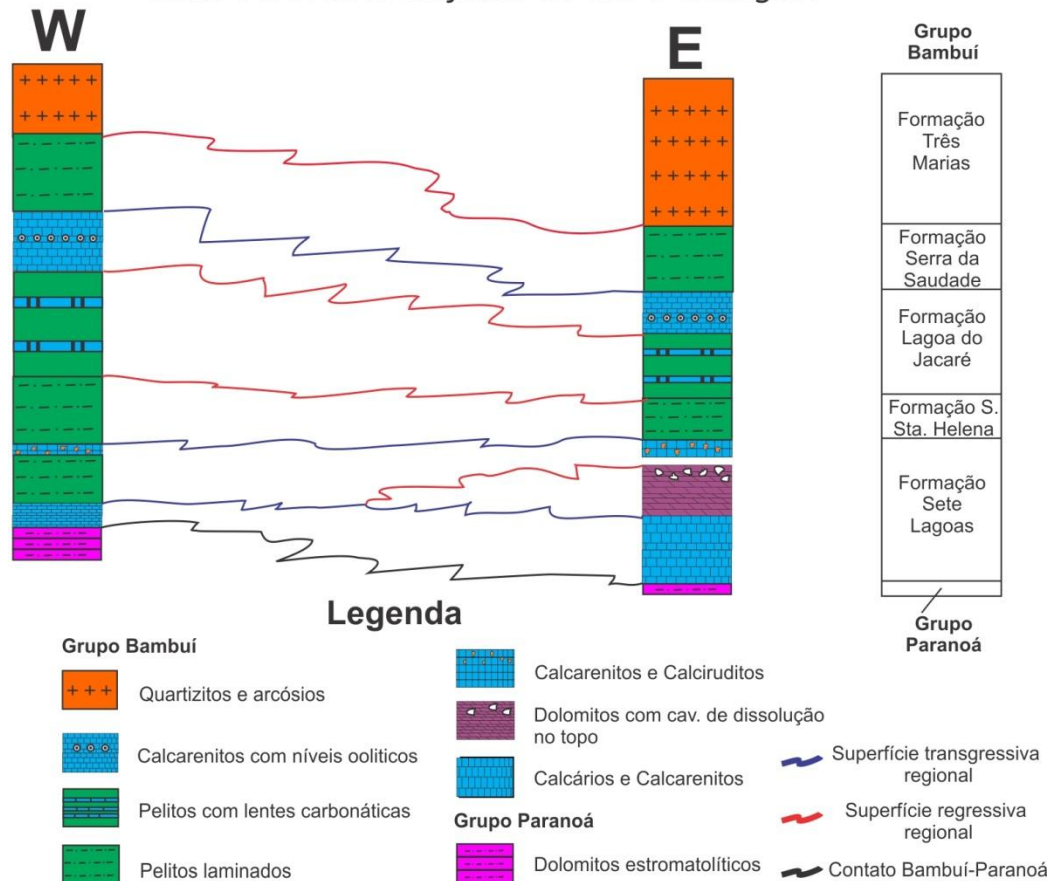


Figura 3 – Comparação estratigráfica do grupo Bambuí dos lados leste e oeste da falha de São Domingos. Modificado de Alvarenga & Dardenne, 1978.

No compartimento a oeste da falha de São Domingos são notadas algumas diferenças em relação ao leste. Ocorrem rochas siliciclásticas no grupo Paranoá, logo em contato com a falha, mas a ausência do pacote dolomítico, que apresenta cavidade de dissolução em direção ao topo do pacote, na parte média da formação Sete lagoas é fato marcante (Fig. 3). No restante do grupo Bambuí as associações de fácies encontradas são muito similares com as do lado leste (Alvarenga, 1978), porém pode ser observado um leve aumento na espessura sedimentar, no lado oeste.

Por se tratar de uma zona de transição do CSF com a zona externa da FB, a geologia é diferenciada na região. É o sistema de falhas de São domingos, que separa o cráton da faixa móvel (Fig. 4). A tectônica verticalizou os acamamentos próximos à zona de falha, foram observadas em campo mergulhos variando de 66° a 89° sempre mergulhando para leste. Dobramentos mesoscópicos interestratais podem ser observados, além de meso e micro falhas. À medida que o observador se afasta (tanto para E quanto para W), as camadas passam a sub-horizontais.

### Seção Geológica da Serra de São Domingos

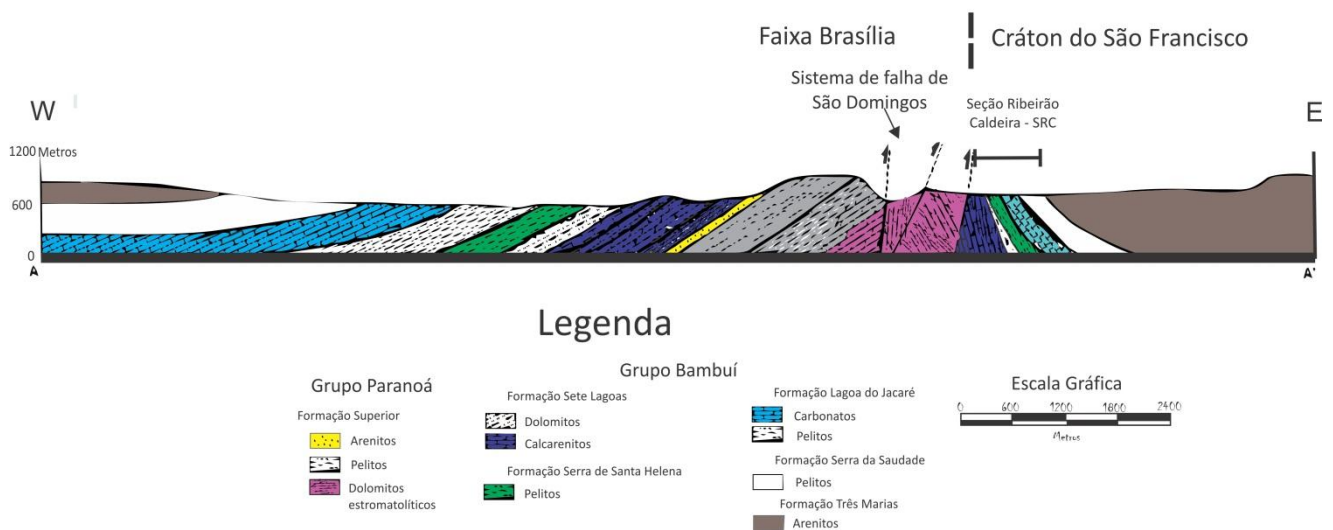


Figura 4 – Seção Geológico/Estrutural (modificado de Alvarenga, 1978) apresentando o sistema de falhas de São Domingos - passagem da faixa Brasília para o cráton do São Francisco.

O levantamento estratigráfico realizado nessa pesquisa foi feito em afloramentos contínuos e bem preservados, expostos devido à compressão da falha de São Domingos, no compartimento autóctone (CSF). O mapa geológico do ribeirão Caldeira (Fig. 5), mostra um alinhamento tectônico na direção NW-SE de todo pacote sedimentar. Observando o mapa regional (Fig. 1) na área de estudo (SRC), um megadobramento causado pelo empurrão da falha de São Domingos é tido como causador da orientação das camadas. Para facilitar o empilhamento estratigráfico o córrego tem direção NE-SW e para compor toda estratigrafia do grupo Bambuí foram levantados 7 perfis estratigráficos (Fig. 5).

A tectônica foi intensa próximo a falha, é comum a presença de dobras e falhas na área de estudo, mas essa interação não interferiu na estratigrafia do grupo Bambuí. Apenas a porção mais basal da formação Sete Lagoas foi cortada pela

falha de São Domingos. Apesar da tectônica dúctil-rúptil ser evidente, são escassos evidências hidrotermais, restringindo-se a um veio de sílica na porção intermediária da SRC além de veios de calcita em zonas de brechação. O metamorfismo é baixo (xisto verde baixo), pois a mineralogia metamórfica mais comum é a sericita, além de um pouco de quartzo e da recristalização dos carbonatos.

### **6.5. Amostragem e Métodos**

Para a interpretação e correlação dos dados de afloramento foi feita uma descrição detalhada das fácies que compõem principalmente as unidades carbonáticas da área de estudo (formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré). Além dos afloramentos foram descritas 29 lâminas petrográficas, 3 amostras estudadas no Mev, determinação e interpretação de dados geoquímicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Rb e Sr) e isotópicos (C, O e Sr) de 82 amostras de rocha que auxiliaram na individualização das fácies, evolução estratigráfica e na correlação entre os levantamentos de superfície (seção no Ribeirão Caldeira) e subsuperfície (utilizando dados da bibliografia do poço 1 RC-0001-GO).

Ao todo foram levantadas sete seções estratigráficas (Fig. 5) a fim de cobrir todo o Grupo Bambuí ao longo do Ribeirão Caldeira. O empilhamento totalizou cerca de 900m, do contato com o Grupo Paranoá até o início da Formação Serra da Saudade do Grupo Bambuí (escala 1:100).

A coleta das amostras dava sempre preferência aos afloramentos carbonáticos, que quando contínuos eram coletados de cinco em cinco metros. Ao final as mais de 100 amostras de afloramento foram pré-selecionadas para posteriores análises químicas, isotópicas e confecção de lâminas petrográficas.

A preparação das amostras foi realizada no laboratório de preparação de amostras do IG-UNB (Instituto de Geociências da Universidade de Brasília). Todas as amostras selecionadas (82 amostras) foram britadas e moídas, seguindo rotina vigente no laboratório.

As determinações de elementos maiores e Sr foram processadas no laboratório de Isótopos estáveis do Departamento de Geologia - NEG-LABISE da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE.



# Mapa Geológico Local

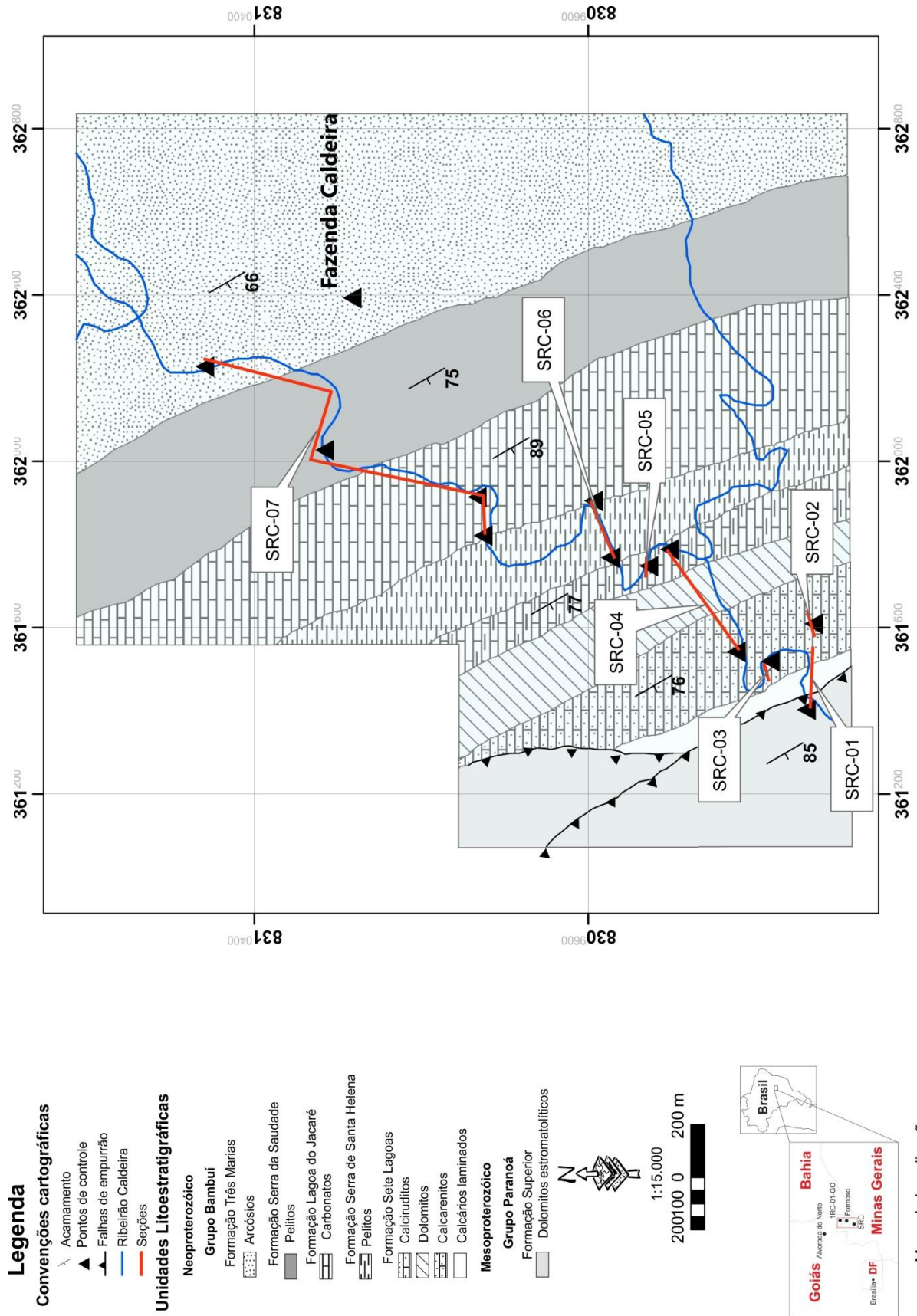


Figura 5 – Mapa geológico da área de estudo (Modificado de Alvarenga, 1978) com a localização das 7 seções estratigráficas levantadas

As amostras foram determinadas por perda ao fogo e por fusão com tetraborato de lítio. As leituras foram realizadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku, modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh, do LABISE-UFPE. Os resultados obtidos foram recalculados para 100% para considerar a perda ao fogo (tab. 3).

Os dados de Isótopos estáveis foram obtidos no Laboratório de Isótopos Estáveis do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília utilizando-se do Espectrômetro de massa DELTA V PLUS com entrada dupla (dual inlet), que permite a análise de amostras por sistema on line e off line. Equipado com analisador GAS BENCH II com autosampler para determinação de razões isotópicas de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  em carbonato.

Para a análise de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , 50 mg de amostra pulverizada foram digeridas por ácido acético 0,5N. Após segundo ataque ácido com HCl 2,5N o Sr foi separado em colunas orgânicas primárias grandes. A razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  das amostras foi determinada pelo espectrômetro de massa de ionização termal, marca Finnigan MAT 262, no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília.

As amostras para análise no microscópio eletrônico de varredura – Mev (IG-UnB), foram selecionadas devido ao seu percentual poroso. As imagens adquiridas pelo MEV são principalmente duas: imagem de elétrons secundários e imagem de elétrons retroespalhados (backscattered). As imagens do detector de elétrons secundários são utilizadas principalmente para estudar morfologia. As imagens do detector de elétrons retroespalhados nos indicam porções nas amostras que possuem elementos químicos com números atômicos diferentes. Quanto maior o brilho, maior o número atômico.

## **6.6. Fácies da Seção Ribeirão Caldeira – SRC**

Com os levantamentos de campo e posteriores análises laboratoriais (petrografia e geoquímica), foi possível individualizar 9 fácies sedimentares nos perfis estratigráficos levantados, que serão descritas a seguir: Dolomito Estromatolítico – Doe; Calcarenito Laminado – Clm; Calcarenito/Dolarenito Oolítico – CaO; Dolarenito Laminado – Dlm; Dolomito “Cristalino” – Dic; Pelito Laminado – Plm;



Pelito com lentes de Arenito – Pla; Pelito com lentes de Carbonato – Plc e Calcarenito com níveis de Calcirudito - Cacr. Uma única fácies compõe o grupo Paranoá na área de estudo, sendo todas as outras pertencentes ao Grupo Bambuí (Tab. 2). A sucessão vertical das fácies pode ser apresentada na evolução estratigráfica.

#### 6.6.1. Dolomito Estromatolítico – Doe

A fácies Doe (única representante do grupo Paranoá) está localizada na zona da falha de São Domingos (Fig.6A), onde é comum a presença de veios e vênulas carbonáticas, além de falhas e dobras, onde é comum a inversão de camadas. É formada por dolomitos cinzas claro e escuro, com estruturas estromatolíticas do tipo colunar em forma de domo (Fig.6B). Essas bioestruturas formam um paleorecife estromatolítico com pacotes métricos, sendo seu topo erosivo, marcando o final de ciclos de raseamento (Fig.6C).

Essa fácies faz contato superior tectônico com os carbonatos laminados do grupo Bambuí. A química dessas rochas são marcadas por valores elevados tanto de sílica quanto de MgO, sugerindo influência tectônica.

Tabela 2 - Tabela de fácies Sedimentares.

Código de Fácies	Descrição das fácies	Estrutura
<b>Dolomito Estromatolítico – Doe</b>	Dolomitos cinzas claro e escuro com estruturas estromatolíticas.	Estromatólitos do tipo colunar em forma de domo.
<b>Calcarenito Laminado – Clm</b>	Calcarenitos cinza claros e escuros, com níveis de pelitos.	Laminação Sub-horizontal, microlaminação.
<b>Calcarenito/Dolarenito Oolítico – CaO</b>	Calcarenitos de coloração cinza claro e escuro formados por oolitos.	Maciço com lentes oolíticas.
<b>Dolarenito Laminado – Dlm</b>	Dolomitos laminados de coloração esbranquiçada.	Laminação Sub-horizontal, microlaminação, marcas onduladas, dissolução vugular e pacotes maciços.
<b>Dolomito “Cristalino” – Dic</b>	Dolomitos de coloração branca acinzentada, com níveis carbonáticos e de pelitos.	Dissolução do tipo vugular e pacotes maciços e laminação sub-horizontal.
<b>Calcarenito com níveis de Calcirudito – Cacr</b>	Calcarenitos cinzas com níveis de microconglomeráticos.	Marcas onduladas, estratificações cruzadas (onduladas truncadas), laminação Sub-horizontal.
<b>Pelito com lentes de Arenito – Pla</b>	Pelitos de coloração cinza a negra com pacotes de arenito fino a muito fino.	Estratificação Plano-Paralela.
<b>Pelito com lentes de Carbonato – Plc</b>	Pelitos de coloração cinza a negra com lentes centimétricas de calcário.	Estratificação Plano-Paralela.
<b>Pelito Laminado – Plm</b>	Siltitos e argilitos de coloração negra.	Estratificação Plano-Paralela.

### 6.6.2. Calcarenito Laminado – Clm

Essa fácies é formada por calcarenitos cinza claros e escuros de laminação horizontal com filmes de pelitos entre os pacotes carbonáticos (Fig. 6D). Essa unidade ocorre ao longo das formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré no Grupo Bambuí. Forma pacotes decamétricos, com sets centímetros. Seu contato é gradacional com as unidades Clm, CaO, Dlm, Pla, Plc e Plm e tectônico com a associação de fácies Doe.

Em lâmina petrográfica as feições primárias como microlaminações são formadas pela associação siliciclástica-carbonática (Fig.7I), alternando cristais detríticos de calcita com argilo-minerais e micas. Vênulas de calcita e filmes de dissolução também são comuns.

A geoquímica desta fácies mostra valores de  $Al_2O_3$  elevados (até 10%), por vezes os valores de  $SiO_2$  são anômalos. Os resultados de Sr apresentam valores em torno de 100 ppm, porém valores chegando a mais de 4000 ppm ocorrem, evidenciando que algumas porções carbonáticas preservam sua geoquímica original de calcários puros.

### 6.6.3. Calcarenito/Dolarenito Oolítico – CaO

A associação de fácies CaO é representada por calcarenitos de coloração cinza claro e dolarenitos esbranquiçados formados por oolitos milimétricos, imersos em uma matriz carbonática (calcita ou dolomita) (Fig.6E). A fácies ocorre ao longo da Formação Lagoa do Jacaré, e na formação Sete Lagoas. Faz contato gradacional com as fácies Clm, Pla, Plc e Plm.

Em lâmina delgada os oolitos são facilmente mascarados pela forte recristalização que essas rochas sofreram devido a tectônica regional. Com isso muitas vezes observam-se “sombras reliquiares” dos mesmos em lâmina (Fig.8B). Essa unidade está sempre associada às fácies Clm e Dlm em forma de lentes ou camadas intercaladas.

### 6.6.4. Dolarenito Laminado – Dlm



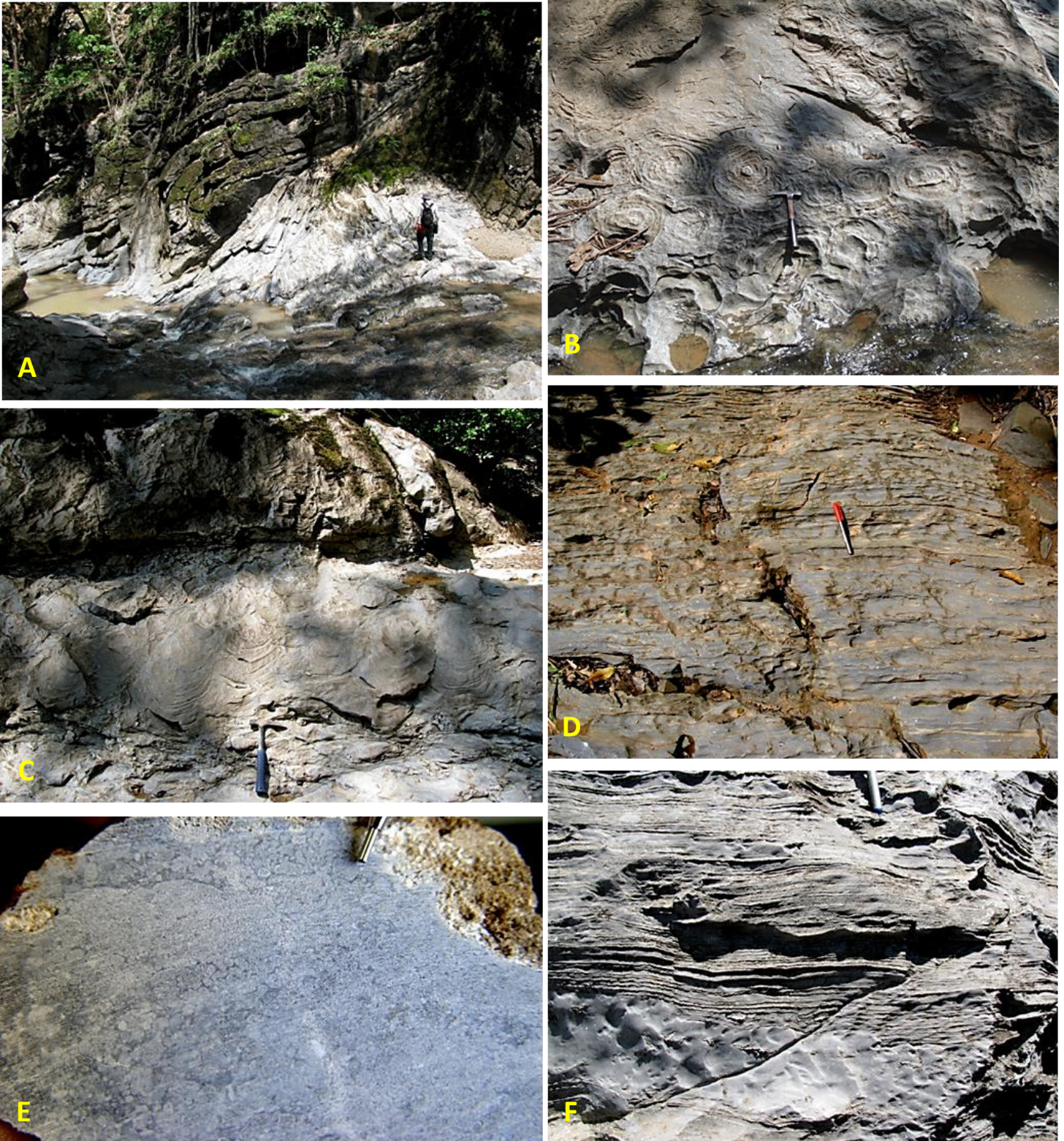


Figura 6: A – Afloramento de dolomitos do grupo Paranoá na zona da falha de São Domingos na área de estudo. B - Estromatólito colunar em forma de domo, com diâmetro de aproximadamente 30 cm. Seção basal da fácies Doe. C – Contato erosivo de duas gerações de estromatólitos, notar ciclo de reseamento de alta frequência e notar também que as camadas estão invertidas. D – Calcarenito com finas lâminas de pelito negro, formando um ritimito - Fácies Clm. E – Dolarenito com níveis oolíticos, observar na porção superior da foto formas ovais milimétricas - fácies CaO. F – Afloramento de dolomito laminado em contato com pacote maciço na base da foto, fácies DIm. Notar escala na porção superior da foto.



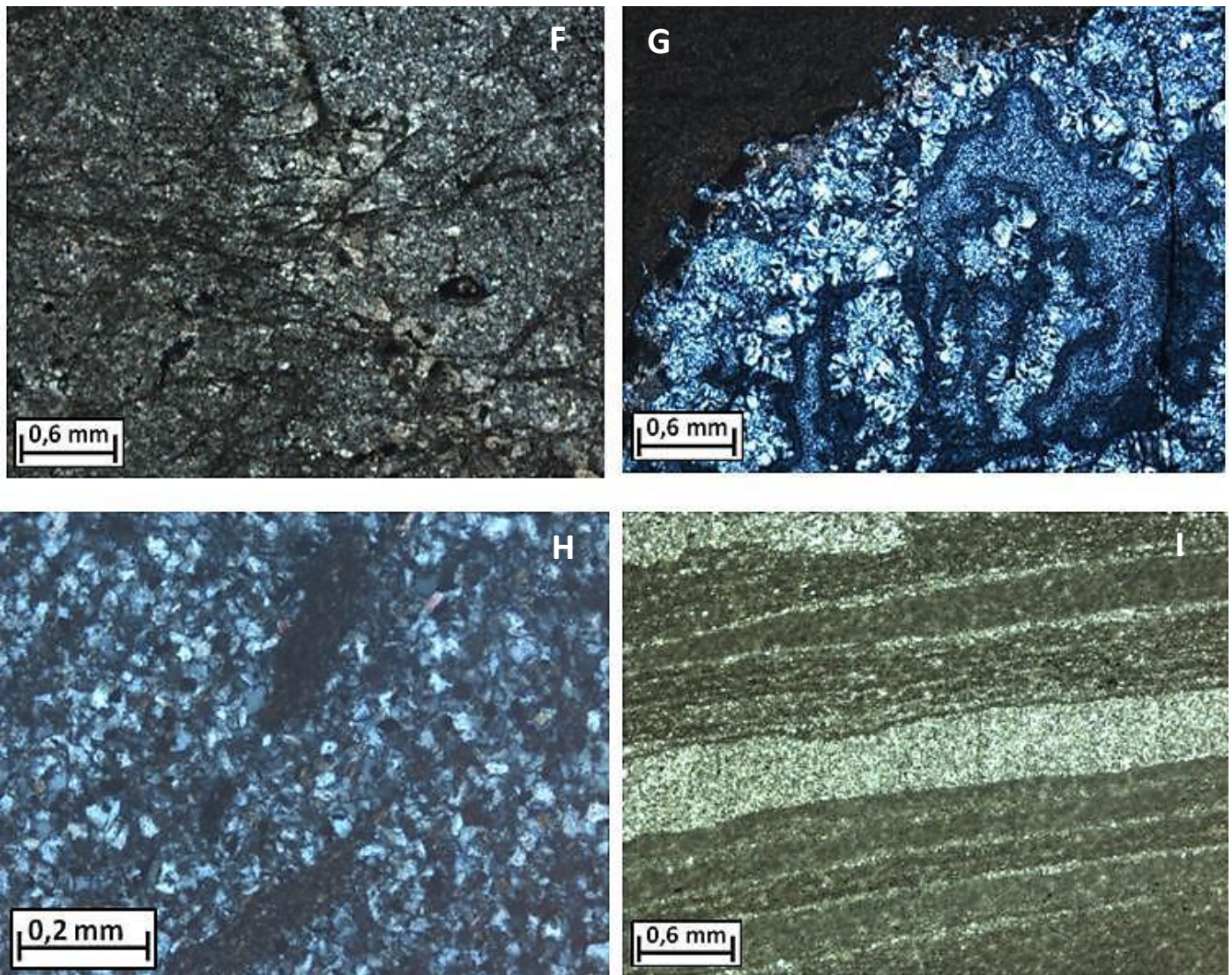


Figura 7: F – Lamina delgada: amostra 4SRC-150. Aumento de 4x, nicóis cruzados. Dolomitização. G – Lamina delgada: amostra 4SRC-181. Aumento de 4x, nicóis cruzados. Silicificação, notar cristais com cristalização radial no canto superior direito. H – Lamina delgada: amostra 7SRC-15. Aumento de 10x, nicóis cruzados. Arenito fino com clastos de lama. I – Lamina delgada: amostra 4SRC-250. Aumento de 4x, nicóis cruzados. Calcarenito laminado. Porção escura de granulometria mais fina.

O pacote de dolomito laminado foi descrito no topo da formação Sete Lagoas. Apresentam coloração cinza clara a esbranquiçada (Fig.9G), com granulometria variando de fina a grossa, devido a ação da recristalização.

Nessa fácies são encontrados fraturas e veios de carbonato, além de estruturas de dissolução do tipo vugular, dando em alguns trechos um bom percentual de espaços vazios na rocha. Sua principal estrutura sedimentar são as laminações subparalelas que se intercalam com sets maciços (Fig.6F). Essa fácies faz contato com Cacr, DiC e Dic de forma gradacional.

As lâminas analisadas que incluem essa fácies apresentam variação no tamanho do grão. Foram descritos trechos em que cristais de dolomita fina fazem contato com cristais médios (Fig.8C), evidenciando a recristalização sofrida por essas rochas. Cristais de apatita foram identificados com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura - MEV (Fig.8E). Uma feição que também se refletiu com a utilização do MEV, foram os espaços vazios deixados pela textura vugular, onde 3 amostras (Fig.8D), que apresentaram boa quantidade de microcavidades foram selecionadas e analisadas.

A geoquímica apresenta valores entre 0,8 a 0,35 para a razão MgO/CaO, confirmando o seu caráter dolomítico e valores baixos para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> e Sr, onde esse último raramente atinge 100ppm.

#### 6.6.5. Dolomito “Cristalino” – Dic

A fácies Dic ocorre associada ao pacote dolomítico do topo da formação Sete Lagoas. Tem coloração branca acinzentada, e é constituída por dolomitos com níveis de calcarenitos de laminação primária incipiente. Essa fácies faz contato abrupto com a Dlm. Feições de dissolução do tipo vugular são comuns também nessa fácies. Ao todo foram descritos dois trechos de Dic formando pacotes métricos, sendo o ultimo trecho (final do pacote dolomítico da formação Sete Lagoas) esta associado a um nível silicificado.

Em lamina delgada se apresenta bem recristalizada com cristais de calcita e dolomita (principalmente), no geral de granulometria fina. Na Fig.8F é possível observar cristais de calcita e dolomita (maior birrefringência) e na Fig.8G a sílica substituindo o dolomito no nível silicificado. A geoquímica mostra valores elevados na razão MgO/CaO, sendo a porcentagem de SiO<sub>2</sub> baixa (exceto no nível de sílica). Os valores de Sr e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> também são baixos (abaixo de 100ppm e menos de 1% respectivamente).



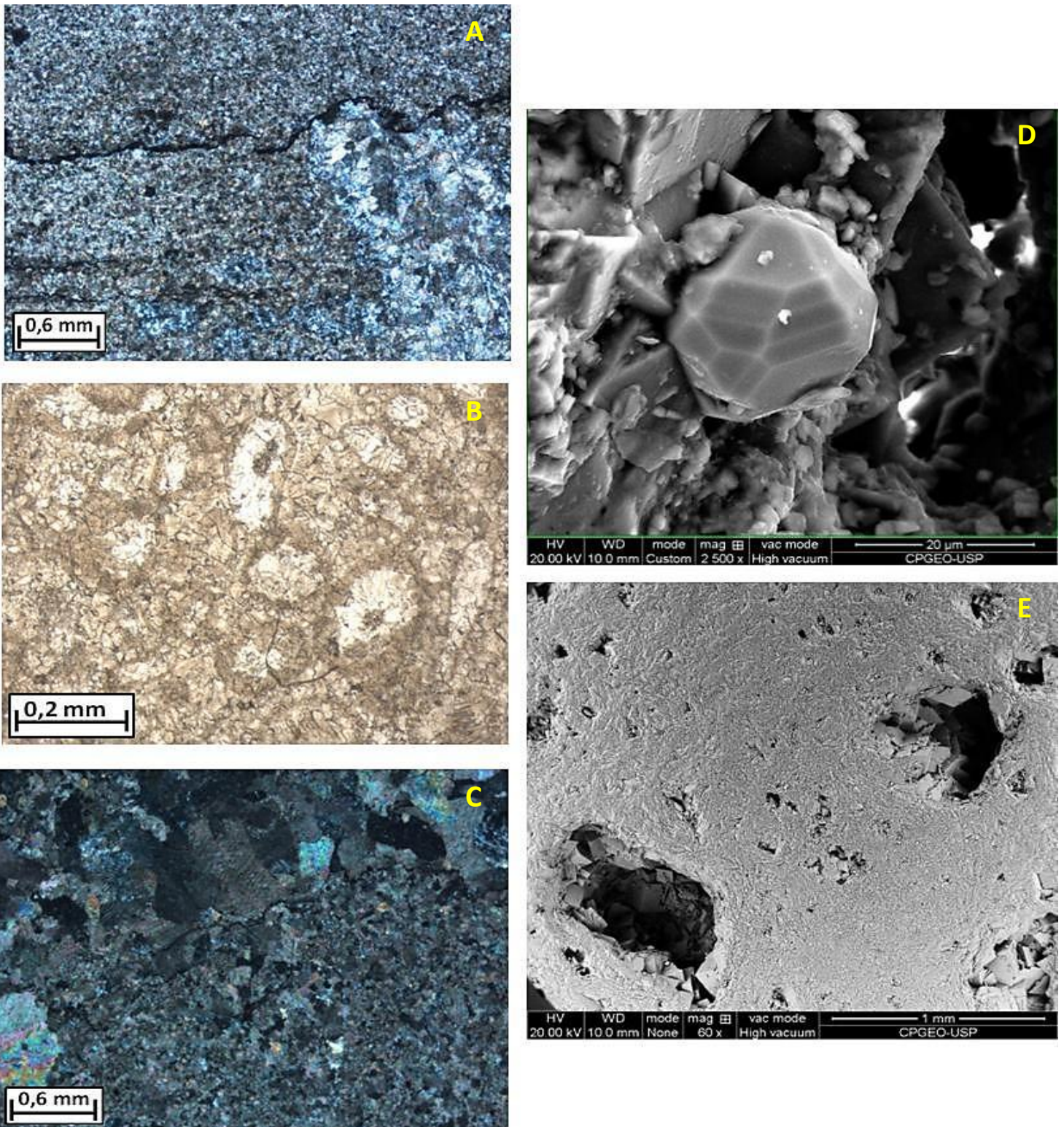


Figura 8: A – Lâmina delgada: amostra 3SRC-25. Aumento de 4x, nicóis cruzados. Veio de calcita no canto direito da lamina e filme de dissolução na porção central. B – Lâmina delgada: amostra 8SRC-120. Aumento de 10x, luz plana. Calcarenito Oolítico. C – Lâmina delgada: amostra 4SRC-179. Aumento de 4x, nicóis cruzados. Contato Dolomito muito fino com dolomito fino. D – Imagem de Mev utilizando detector de elétrons secundários. Aumento 2500x. Detalhe do cristal de apatita. E – Imagem de Mev utilizando aumento 60x, detector de elétrons retroespalhados. Detalhe micro poros.

#### 6.6.6. Calcarenito com níveis de Calcirudito – Cacr

A fácies Cacr aparece de forma bem restrita na seção levantada. Encontram-se no topo da formação Sete lagoas e faz contato com a fácies DIm. É formada por calcarenitos com níveis de calciruditos de aspecto micro-conglomerático (Fig.9H), com intraclastos (lama carbonática).

Os pacotes de calcarenito tem granulometria variando de fina a média, com pelitos entre as camadas de carbonáticos. A espessura dos bancos carbonáticos esta em torno de 5m. São encontradas diversas estruturas sedimentares como marcas onduladas, estratificações cruzadas onduladas truncadas (com formas caóticas - Fig.9I) e laminação sub-horizontal.

#### 6.6.7. Pelito com Lentes de Carbonato – Plc

São representados por pelitos de coloração cinza a negra com lentes centimétricas de calcário (Fig.9J) e estratificação plano-paralela. Essa fácies ocorre na formação Lagoa do Jacaré, no topo da formação Sete Lagoas e na formação Serra da Saudade. Faz contato gradacional com as fácies CIm, CaO e Plm.

#### 6.6.8. Pelito com Lentes de Arenito – Pla

A Fácies Pla é encontrada somente na formação Serra de Santa Helena, sendo representada por siltitos cinza a negros com lentes de arenito muito fino. A estratificação plano-paralela é a estrutura sedimentar típica. Faz contato gradacional com a fáceis Plm.

Foi selecionada uma amostra de arenito muito fino para os estudos petrográficos nessa fácies. A mineralogia encontrada foi de quartzo, oxido de ferro e mica branca. É comum associados com clastos de pelitos (Fig.7H).

A geoquímica (rocha total) dessa fácies tem valores elevados de sílica (33 %) e cálcio (29 %) e baixo para alumínio (6%) e magnésio (2,5 %). Portanto pode ser classificada como um pelito carbonático.



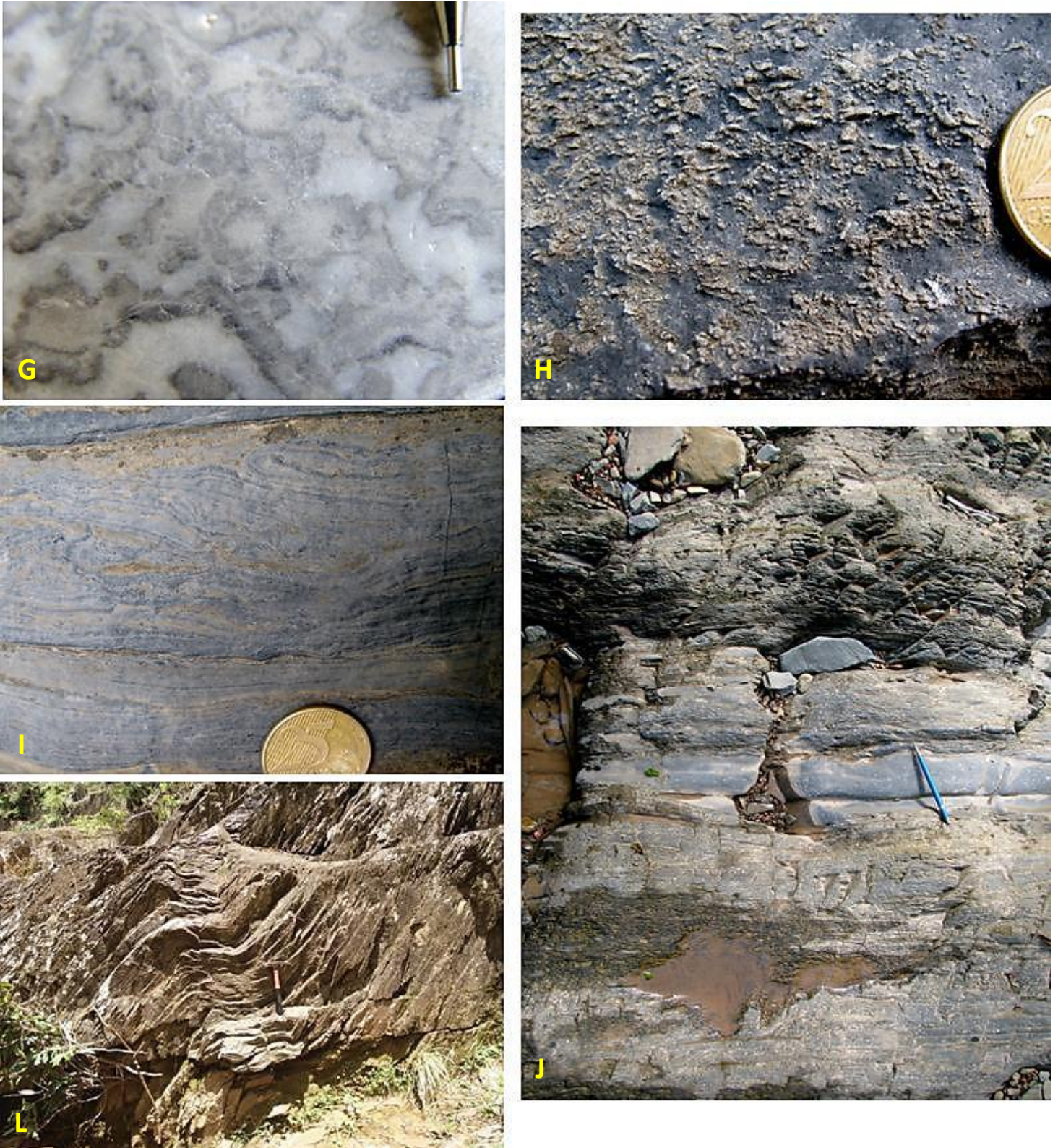


Figura 9: G – Dolomito cinza claro, notar manchas claras de dolomitização, fácies DIm. H - Nível de calcirudito da fácies Cacr, notar fragmentos centimétricos de lama carbonática. I – Calcarenito ondulado com microcruzadas (onduladas truncadas) da fácies Cacr. J - Lente de carbonato imerso em pelitos da fm. Serra de Santa Helena, fácies Plc . L - Meso-dobra em pelito negros da formação Serra da Saudade, fácies Plm.



### 6.6.9. Pelito Laminado – Plm

A fácies do Plm ocorre nas formações Serra de Santa Helena, Serra da Saudade e na formação Lagoa do Jacaré. É constituída por siltitos e argilitos laminados de coloração negra a cinza clara com estratificação plano paralela (Fig.9L). A espessura dos pacotes varia em torno de dezenas de metros. Fraturas e meso dobras (Fig.9L) ocorrem comumente nessa unidade. Faz contato gradacional com a Plc, Pla e Clm.

## 6.7. Associação de fácies e Sistema deposicional

### 6.7.1. Introdução:

Diversos autores (Dardenne, 1978; Alvarenga, 1978; Martins, 1999;) atribuem a deposição do grupo Bambuí a uma Plataforma carbonática do tipo Rampa. Para o presente trabalho foi utilizado o modelo de Tucker e Wriqth (1990), na qual a plataforma (tipo rampa) é subdividida em 3 ambientes deposicionais (Bacia, Rampa intermediária/Rampa externa e Rampa interna) (Fig. 10), com adaptações para a realidade das rochas da SRC.

BACIA	RAMPA INTERMEDIÁRIA RAMPA EXTERNA	RAMPA INTERNA		PERFIL DE SEDIMENTAÇÃO
Abaixo do Nível de Base das Ondas de Bom Tempo		Dominado por Ondas	Protegido / Subaéreo	
Mudstones e folhelhos fossilíferos	<i>Wakestones</i> e <i>mudstones</i> bioclásticos e/ou peloidais Depósitos de <i>shoreface</i> inferior retrabalhados por ondas e dominados por <i>grainstones</i> <i>Mounds</i> algais e argilosos	Linha de costa de alta energia com complexos de canais de maré e praia dominados por <i>grainstones</i> Dunas móveis oolíticas e/ou bioclásticas Recifes isolados	<i>Sabkha</i> com evaporitos, mistura de siliciclásticos e carbonatos Planície de maré com estromatólitos colunares Laguna restrita dominada por <i>wakestones</i> e <i>mudstones</i> fossilíferos e peloidais Deltas de <i>washover</i> com <i>grainstones</i> Recifes lagunares isolados	FACIES

Figura 10 – Modelo de deposicional de uma plataforma o tipo Rampa. Modificado de Tucker e Wriqth, 1990.

Para a individualização de cada sub-ambiente foram definidas as associações de fácies a partir das fácies previamente classificadas, além de associações regionais com os dados para o norte de Minas Gerais (Alvarenga, 1978; Clark e fugita, 2001; Tonietto, 2009) que são: Recife estromatolítico, Laguna Restrita e Aberta, Bancos Carbonáticos, Bancos Oolíticos, Fluxo de Massa, Pelitos de Borda de Plataforma e Pelitos Marinhos (tab. 3).

<b>Fácies</b>	<b>Associação de Fácies</b>	<b>Ambiente Depositional</b>	<b>Sistema Depositional</b>
Dlm	Laguna Restrita e Aberta	Rampa Interna	Plataforma carbonática em rampa
Dic			
Cao	Bancos Oolíticos		
Cacr	Canais de Maré Dominado por Onda		
CIm	Bancos Carbonáticos	Rampa Intermediária e Externa	
Pla	Pelitos de Borda de Plataforma		
Plc			
Plm	Pelitos Marinhos	Bacia	

Tabela 3 – Fácies, Associação de fácies, Ambiente e sistema deposicional do grupo Bambuí na SRC.

### 6.7.2. Recife Estromatolítico

A associação de fácies do Recife Estromatolítico (Fig. 11A) é formada somente pela fácies Doe. Essas rochas foram encontradas por cerca de 50 m no início do empilhamento. As “cabeças” dos estromatólitos formam colunas dessimétricas, sendo sua geometria dômica. Foram coletadas amostras para petrografia e geoquímica da associação de fácies de recife estromatolítico, mesmo sabendo que ela não faz parte da plataforma carbonática do grupo Bambuí. A individualização se deve por se tratar do embasamento na região.

### 6.7.3. Laguna Restrita e Aberta

Essa associação de fácies compreende a porção protegida da plataforma interna, num contexto onde as lagunas ora eram restritas, refletindo um ambiente mais calmo que favorecia a deposição de pelitos, ora com maior influência marinha facilitando a deposição e preservação dos calcários. Abrange as fácies Dlm e Dic

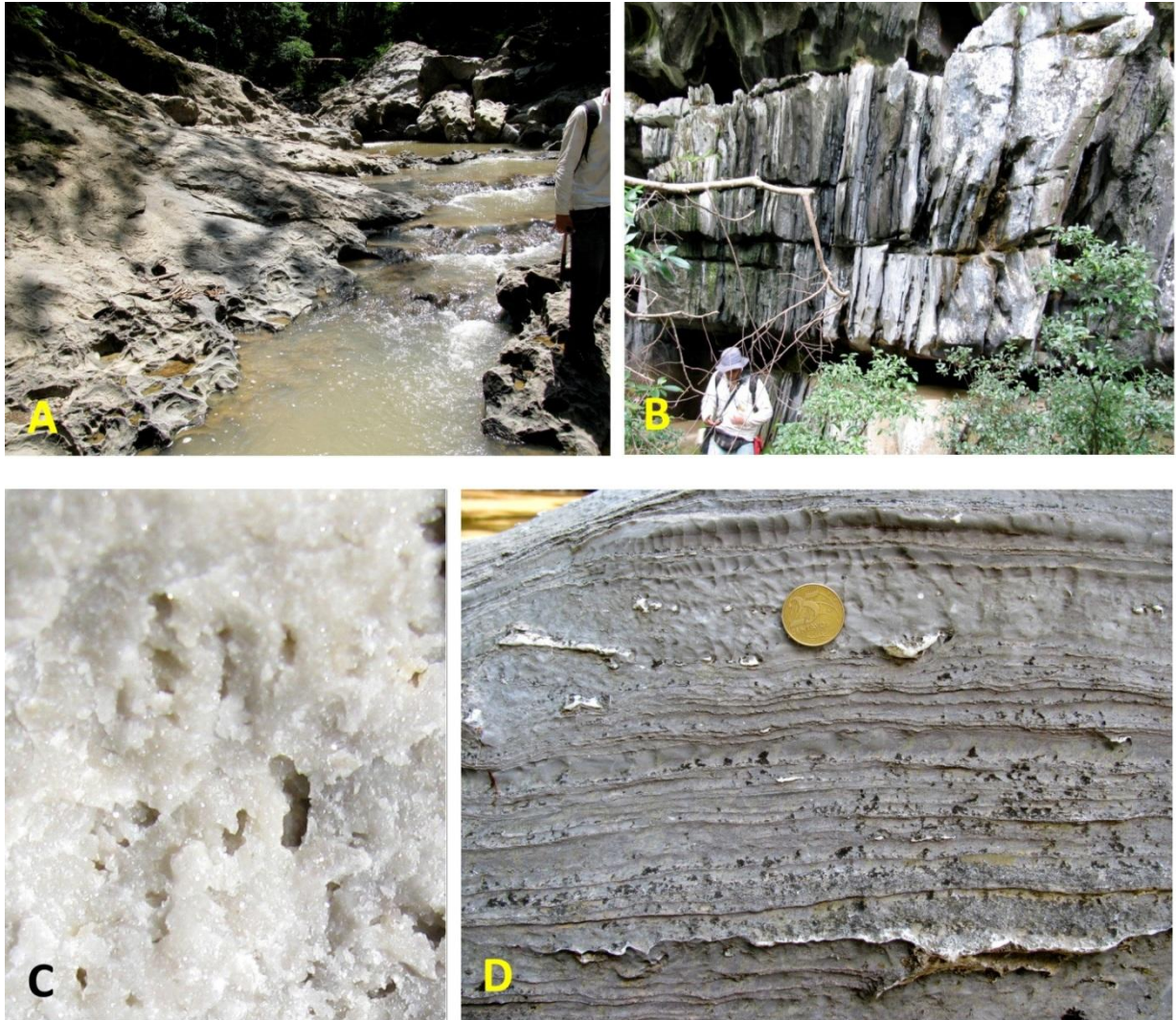


Figura 11: A – Recifes estromatolíticos no topo do grupo Paranoá. Notar extensão das comunidades estromatolíticas em toda porção esquerda da foto. B – Associação de fácies de Bancos carbonáticos com laminação evidenciada pelo intemperismo. Rochas verticalizadas pela ação tectônica. C – amostra de mão com cavidade de dissolução centimétricas, interna a rocha. Associação de fácies de Lagunas restrita e aberta. D – Dolomitos laminados da associação de fácies de Lagunas restrita e aberta (estromatólitos estratiformes?).

Dentro do pacote de rochas dolomíticas da formação Sete Lagoas, que ficaram registradas na SRC, ocorrem pacotes bem laminados (Fig. 11D) que se assemelham a estruturas estromatolíticas estratiformes planares (Gray, K. !989).

Em um trecho de rochas no topo do pacote dolomítico foi descrita uma grande quantidade de estruturas de dissolução do tipo vugular, internos a rocha (fig 11C), que reflete momentos em que essa laguna ficou exposta aos agentes intempéricos. O fato é comprovado com a petrografia dos pelitos carbonáticos, localizados logo acima estratigraficamente do pacote dolomítico, que estão silicificados (amostra



4SRC-181) graças a o evento brasileiro ainda no neoproterozóico. Esse evento hidrotermal local, associado a uma falha, fez com que os poros, formados num momento após a deposição, cristaliza-se sílica radial (Fig. 12) como resultado do preenchimento de um micro poro preexistente. Para a indústria do petróleo essa situação geológica (dolomitos carstificados), tem boas características para um reservatório de hidrocarbonetos.

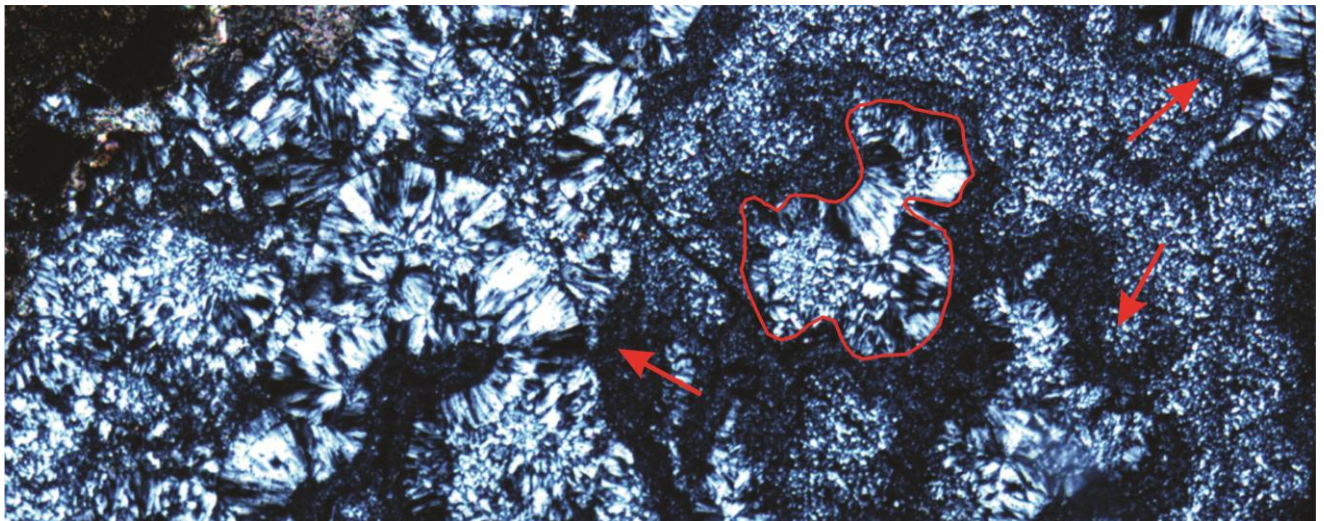


Figura 12 – Zoom na fotomicrografia em lamina petrográfica da amostra 4SRC-181. Detalhe do preenchimento de sílica radial, em microporos pré-existent, em pelitos carbonáticos do topo da formação Sete Lagoas.

#### 6.7.4. Bancos carbonáticos

Essa associação de fácies é a de maior representação dentre as carbonáticas na seção levantada (SRC). É formada pela fácies Clm e esta localizada na rampa externa da plataforma Bambuí.

São rochas que foram geradas, fruto do retrabalhamento constante dos calcários biogênicos gerados em mar raso. São bancos de calcarenitos que localizam-se abaixo do nível de ondas de tempo bom (NBO da Fig. 10), em grande parte formando ritimitos associados a pelitos negros carbonáticos (Fig. 11B).

#### 6.7.5. Bancos Oolíticos

Essa associação de fácies é formada pelas fácies CaO. São geradas na porção interna da plataforma, na zona dominada por ondas. Tem origem detrítica, estando associada à movimentação das ondas e correntes com a saturação em cálcio e magnésio da água do mar. Sua composição pode ser de oolitos, oncólitos ou trombólitos, fato mascarado pela recristalização (Fig. 8B).

Ocorrem associados aos calcários e dolomitos do grupo Bambuí, estando mais presente na formação Lagoa do Jacaré. Sua geometria devido à tectônica brasileira é em forma de lentes adelgadas, paralelas ao acamamento.

#### 6.7.6. Canal de maré dominado por onda

Essa associação de fácies é representada somente pela fácies Cacr. Esta localizada na plataforma interna da bacia em uma zona influenciada pela maré e ondas. Calcarenitos, calciruditos e pelitos carbonáticos são as rochas descritas nessa associação de fácies. As porções microconglomeráticas são referentes a zonas mais basais, e as calcareníticas mais superficiais de canais de maré, até a chegada da calmaria e a deposição dos pelitos. Dentro das porções calcarenítica é possível identificar níveis em que cruzadas onduladas truncadas e marcas onduladas evidenciam a ação das ondas (Fig. 9I) corroborando a gênese da fácies.

Os contatos superior e basal desse pacote de rochas influenciaram na identificação dessa associação de fácies. Na base dos canais de maré ocorre o pacote dolomítico que, este localizado na porção protegida da plataforma interna. Já acima ocorrem os pelitos da formação Serra de Santa Helena, o que coloca o pacote de rocha numa posição paleogeográfica entre esses dois extremos da bacia.

#### 6.7.7. Pelitos de borda de plataforma

Os pelitos de borda de plataforma localizam-se na plataforma externa, na transição entre as rochas carbonáticas com as siliciclásticas. São representados pelas fácies Pla e Plc,

Essas rochas são em grande parte pelitos com laminação plano-paralela. Quando ocorrem associados à formação Lagoa do Jacaré (principalmente), desenvolvem as lentes carbonáticas devido à saturação dos elementos necessários e com certeza a pouca influência da luz do sol (representantes carbonáticos pouco espessos). No caso das lentes de arenito, que estão restritas a formação Serra de Santa Helena, a interpretação dada é que o aporte siliciclástico fluvial na bacia nesse momento tenha se elevado muito a ponto de registrar na zona de transição plataforma/bacia a deposição dos arenitos finos e inibir a produção de carbonatos.

#### 6.7.8. Pelitos Marinhos

São os pelitos negros localizados na porção profunda da bacia no extremo da plataforma externa. É representado pela fácies Plm. São os depósitos mais distais encontrados em campo, tem como principal estrutura sedimentar a laminação plano-paralela. Ocorrem principalmente na formação Serra da Saudade e Serra de Santa Helena

#### 6.7.9. Plataforma em rampa do grupo Bambuí na SRC

O grupo Bambuí na região da serra de São Domingos, norte de Minas Gerais, tem sedimentação bem diversificada que perdurou por centenas de milhões de anos, no neoproterozóico. Durante todo esse tempo a sedimentação pelito-carbonática registrou diversos momentos dessa plataforma, como quando ela foi exposta e carstificada em sua porção interna. Rochas que registram a porção mais distal e transicional da plataforma estão presentes constantemente (pelitos marinhos e pelitos de borda de plataforma). As porções que se desenvolveram nas zonas influenciadas por ondas e mares também têm seus representantes na região de São Domingos (bancos oolíticos, canais de maré influenciados por ondas e bancos carbonáticos).

Com isso elaborado um bloco diagrama esquemático para a plataforma carbonática do grupo Bambuí na porção a leste da falha de São Domingos. A

situação em que ocorre a carstificação no topo da formação Sete Lagoas foi escolhida por retratar melhor todo o contexto encontrado na SRC (Fig. 13).

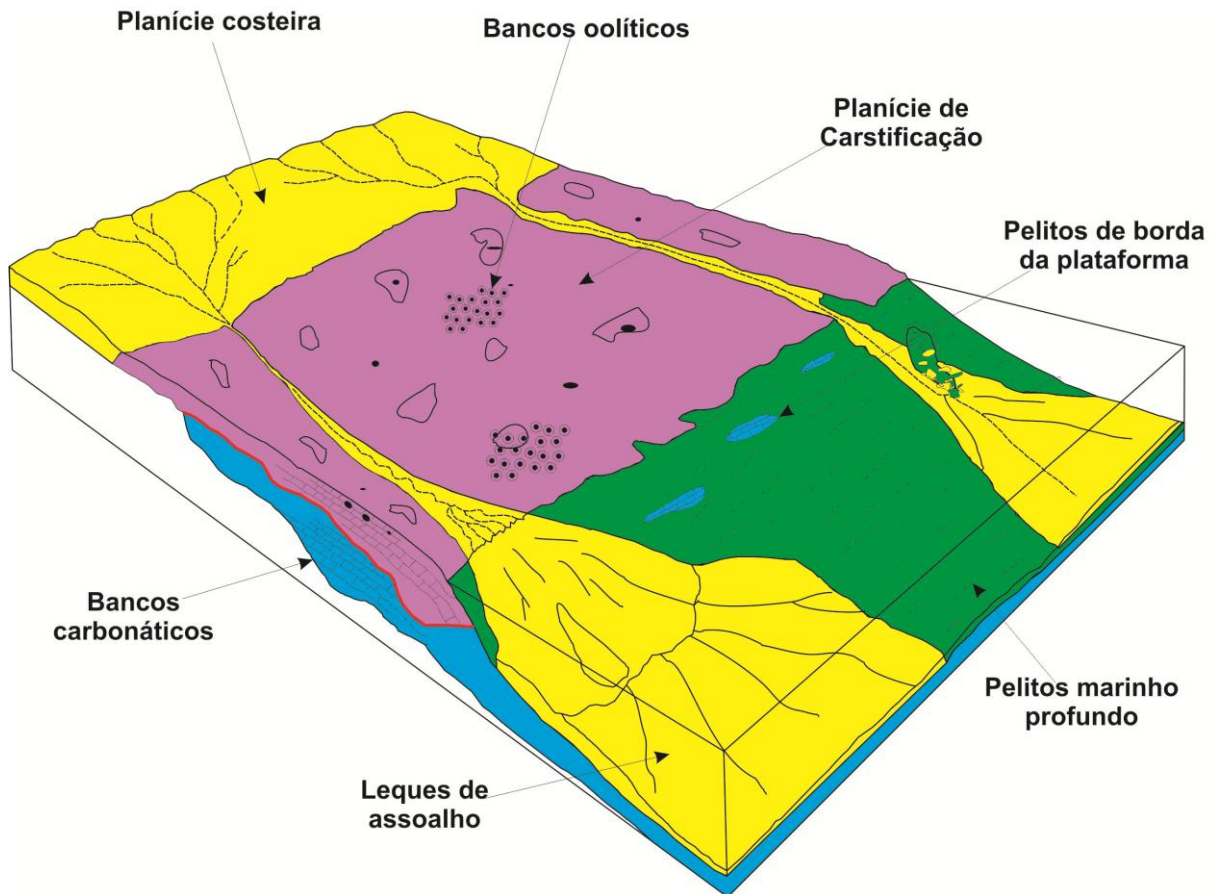


Figura 13 – Bloco diagrama esquemático do momento de carstificação dos carbonatos da formação Sete Lagoas.

## 6.7. Químioestratigrafia

### 6.7.1. Apresentação dos dados

A seleção das 82 amostras, após as coletas de campo, teve como principais objetivos a eliminação de amostras com características que distorcem os dados primários (veios diversos, muito intemperizada, muito metamorfisada).

Para as considerações químioestratigráficas foram interpretados dados geoquímicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{Sr}$ ) e isotópicos (C, O e Sr) das 82 amostras que podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 – Isótopos de C, O, Sr e composição química da seção estratigráfica do Ribeirão Caldeira (SRC)

Amostra	Litologia	Grupo	Formação	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	δ <sup>13</sup> C <sub>(PDB)</sub> ‰	δ <sup>18</sup> O <sub>(PDB)</sub> ‰	MgO (%)	CaO (%)	MgO/ CaO	MnO (%)	Sr (ppm)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
SRC-A	Dolomitos estromatolítico			21,47	0,88	0,3	-8	16,51	23,96	0,69	0,26	111	
SRC-B	Dolomitos estromatolítico	Paranoá	Formação Superior	20,11	2,06	0,3	-6,79	17,20	23,97	0,72	0,33	71	
SRC C	Dolomitos estromatolítico			5,25	1,67	1,48	-6,54	19,59	29,31	0,67	0,3	42	
1SRC-1	Calcário inter. Pelito			13,02	1,62	-0,86	-10,55	1,62	44,46	0,04	0,03	163	
1SRC-3	Calcário inter. Pelito			14,16	1,21	-0,45	-10,41	1,71	44,33	0,04	0,03	206	
1SRC-4	Calcário inter. Pelito			20,02	2,34	0,12	-9,04	6,2	35,16	0,18	0,07	173	
1SRC-12	Calcário inter. Pelito			18,02	1,37	0,52	-10,27	1,27	42,77	0,03	0,07	166	
1SRC-15	Calcário inter. Pelito			24,66	2,44	0,77	-9,66	2,08	37,27	0,06	0,05	168	
1SRC-21	Calcário maciço			1,57	0,07	2,82	-5,39	0,46	53,17	0,01	0,01	2537	
1SRC-27	Calcário maciço			1,51	0	2,31	-5,88	0,36	53,40	0,01	0,01	1978	
1SRC-30	Calcário maciço			1,71	0,2	3,93	-5,66	0,23	53,28	0	0,01	3045	0,707683 ± 2
1SRC-36	Calcário maciço			1,94	0,31	3,45	-7,15	0,31	53,15	0,01	0	1593	
1SRC-40	Calcário maciço			2,18	0,24	3,22	-7,14	0,53	52,88	0,01	0,01	2015	0,707658 ± 1
1SRC-43	Calcário maciço			0,77	0,02	2,77	-8,6	0,7	54,09	0,01	0,01	398	
1SRC-46	Calcário maciço			1,05	0,08	2,72	-8,8	0,36	53,44	0,01	0	810	
1SRC-49	Calcário maciço			1,67	0,22	2,66	-8,52	0,44	52,98	0,01	0	1043	
2SRC-1	Calcário impuro			0,42	0	2,36	-6,78	0,16	54,01	0	0	838	
2SRC-5	Calcário impuro			0,68	0,04	3,19	-8	0,05	54,48	0	0	537	
2SRC-10	Calcário impuro			0,43	0,01	3,27	-8,11	0,69	54,69	0,01	0	495	
2SRC-14	Calcário impuro			0,55	1,82	2,82	-8,81	0,17	53,05	0	0	835	
2SRC-20	Calcário impuro			0,9	0	3,07	-7,24	0,36	54,81	0,01	0	1469	
2SRC-25	Calcário maciço			0,34	0	3,44	-6,64	0,09	54,29	0	0	1463	
2SRC-30	Calcário maciço			0,32	0	3,33	-6,12	0,12	54,99	0	0	2205	
2SRC-35	Calcário maciço			0,45	0,09	3,28	-7,31	0,03	54,93	0	0	2449	
3SRC-1	Calcário inter. Pelito			2,29	0,26	3,94	-4,95	0,38	53,16	0,01	0,01	3606	
3SRC-5	Calcário inter. Pelito			2,71	0,6	3,54	-5,45	0,39	51,86	0,01	0,01	2052	
3SRC-10	Calcário inter. Pelito			5,55	1,29	2,5	-7,44	0,66	49,20	0,01	0,01	720	
3SRC-15	Calcário impuro			5,43	0,77	3,18	-5,86	0,77	50,03	0,02	0,02	1151	
3SRC-20	Calcário inter. Pelito			2,83	0,51	2,7	-6,86	1,02	51,76	0,02	0,01	4898	
3SRC-25	Calcário inter. Pelito			3,94	0,63	3,4	-5,93	0,63	50,97	0,01	0,01	2247	
4SRC-1	Calcário inter. Pelito			0,57	0,01	3,89	-6,45	0,18	54,55	0	0	2496	
4SRC-10	Calcário inter. Pelito			0,46	0,02	3,59	-7,22	0,23	54,39	0	0,01	2734	
4SRC-15	Calcário inter. Pelito			0,53	0,06	3,32	-8,01	0,12	54,37	0	0	1068	
4SRC-20	Calcário inter. Pelito			0,63	0,03	3,01	-10,15	1,03	53,91	0,02	0	528	
4SRC-25	Calcarenito laminado			0,3	0	3,95	-7,87	0,07	54,55	0	0	1795	
4SRC-30	Calcarenito laminado	Bambu	Sete Lagoas	0,24	0	3,44	-9,12	0,18	54,93	0	0	1981	
4SRC-35	Calcarenito laminado			0,32	0	3,7	-8,44	0	55,21	0	0	365	
4SRC-40	Calcarenito laminado			0,41	0	3,41	-10,04	0	54,55	0	0	1460	
4SRC-45	Calcarenito laminado			0,46	0	3,67	-8,43	0,03	54,56	0	0	1289	
4SRC-50	Calcarenito laminado			0,34	0	3,73	-8,28	1,14	53,63	0,02	0	315	
4SRC-77	Dolomito maciço			0,21	0	5,63	-12,89	21,53	34,20	0,63	0,01	74	
4SRC-84	Dolomito maciço			2,25	0,32	5,64	-10,96	1,18	52,11	0,02	0,01	39	
4SRC-89	Dolomito maciço			0,24	0,33	5,23	-13,34	21,32	33,86	0,63	0,01	58	
4SRC-95	Dolomito maciço			0,25	0	4,25	-11,08	5,44	50,56	0,11	0	176	
4SRC-102	Dolomito maciço			0,28	0	4,12	-9,29	1,08	53,65	0,02	0	285	
4SRC-110	Dolomito inter. Calcarenito			0,25	0	4,84	-9,48	1,88	52,93	0,04	0	201	
4SRC-110(A)	Calcário dolomítico			0,29	0	4,23	-11,27	5,51	52,37	0,11	0	153	
4SRC-120	Dolomito maciço			0,22	0	4,57	-11,96	14,32	40,87	0,35	0	126	
4SRC-125	Dolomito maciço			0,24	0	4,16	-10,12	3,80	51,37	0,07	0	111	
4SRC-130	Dolomito estratificado			0,32	0,23	6,33	-10,09	20,38	33,85	0,6	0	69	
4SRC-135	Dolomito estratificado			1,02	0,02	5,86	-10,44	21,19	34,41	0,62	0,01	61	
4SRC-140	Dolomito estratificado			0,51	0	5,86	-10,39	21,60	34,04	0,63	0	57	
4SRC-145	Dolomito estratificado			0,29	0	5,27	-12,09	21,55	34,18	0,63	0,01	57	
4SRC-150	Dolomito estratificado			0,3	0	5,8	-10,51	21,74	34,07	0,64	0	65	
4SRC-155	Dolomito estratificado			0,36	0	5,94	-11,16	21,72	33,15	0,66	0,01	62	
4SRC-163	Dolomito silicificado			83,29	0	6,81	-10,02	10,14	11,65	0,87	0	36	
4SRC-179	Calcário dolomítico			0,42	0,01	6,51	-9,02	4,14	50,98	0,08	0	585	
4SRC-181	Dolomito silicificado			0,7	0,03	8,69	-9,32	20,35	34,14	0,6	0	109	
4SRC-184	Calcário dolomítico			16,32	1,55	9,45	-3,47	16,58	27,81	0,6	0,03	221	
4SRC-189	Calcarenito impuro			16,14	2,5	12,19	-8,08	3,87	39,64	0,1	0,03	612	
4SRC-195	Calcarenito laminado			4,17	0,6	13,83	-8,19	1,29	51,00	0,03	0	1282	
4SRC-200	Calcarenito laminado			3,1	0,16	14,46	-6,06	0,43	52,53	0,01	0	1358	
4SRC-205	Calcarenito laminado			2,37	0,3	14,08	-4,8	0,35	53,07	0,01	0	1563	0,708592 ± 2
4SRC-236(A)	Calcarenito laminado			4,15	0,62	11,8	-8,36	0,67	50,65	0,01	0,01	1943	0,707907 ± 2
4SRC-236(B)	Pelitos calcíferos			22,51	5,06	11,49	-9,65	2,52	35,25	0,07	0,03	1408	
4SRC-250	Pelitos calcíferos			40,77	6,47	5,02	-6,71	10,22	13,37	0,76	0,11	419	
5SRC-3	Pelitos Calcíferos			20,09	3,94	11,46	-8,67	2,46	37,47	0,07	0,04	1397	
5SRC-11	Calcário Impuro Laminado			12,56	2,1	11,65	-6,29	1,27	44,18	0,03	0,03	1886	
6SRC-133	Siltitos laminados	Bambu	Serra de Santa Helena	33,57	6,27	9,59	-10,34	2,5	29,75	0,08	0,09	1113	
6SRC-166	Calcários lami. Oolíticos			2,99	0,58	11,17	-6,83	0,71	51,75	0,01	0,06	1818	
7SRC-2	Calcário inter. Pelito			0,39	0,04	11,44	-6,49	0,34	54,18	0,01	0	2176	0,707922 ± 2
7SRC-10	Calcário inter. Pelito			22,7	3,84	4,46	-3,47	11,00	27,21	0,4	0,29	760	
7SRC-25	Siltito lamin.			0,34	0	*	*	0,09	54,29	0	0	*	
7SRC-35	Calcarenito			3,87	0,35	9,87	-7,76	0,94	51,60	0,02	0,03	3364	0,708143 ± 2
7SRC-48	Siltito com lentes carbonato			38,85	5,65	6,98	-11,55	2,64	24,37	0,11	0,71	2428	
7SRC-59	Siltito lamin.	Bambu	Lagoa do Jacaré	75,49	2,04	*	*	5,05	0,00	0	0,08	157	
7SRC-80	Calcário inter. Pelito			48,63	11,26	7,66	-12,74	3,76	15,41	0,24	0,24	874	
7SRC-84	Calcarenito			10,32	2,88	8,53	-10,86	2,46	43,60	0,06	0,32	1938	
7SRC-115	Calcário inter. Pelito			12,12	3,31	8,84	-5,77	1,63	43,49	0,04	0,02	1682	
7SRC-153	Calcarenito lamin.			4,16	0,87	9,51	-6	0,52	51,61	0,01	0,01	3327	
7SRC-158	Calcarenito lamin.			11,72	2,74	9,17	-6,18	1,44	44,39	0,03	0,03	2114	
7SRC-168	Calcarenito lamin.			14,4	2,94	8,14	-6,75	1,48	42,7	0,03	0,03	2142	

\* Não detectado



### 6.7.2. Resultados

As interpretações quimioestratigráficas da SRC foram balizadas por gráficos de dispersão que auxiliaram na individualização de fácies e validação dos dados. Além disso foi possível comparar os dados isotópicos de C e O da SRC com os dados do Poço Rio Corrente (1-RC-1-GO) (Tonietto, 2010). Já as razões isotópicas do Sr foram plotadas em gráficos globais permitindo o estabelecimento de uma posição temporal relativa para a SRC.

Para seleção das amostras mais preservadas quanto à alteração hidrotermal foi gerado um gráfico de dispersão Sr (ppm) x MnO% (Fig.14), como sugerido por Misi & Veizer 1998. Observando o gráfico fica claro que as amostras tem valores entre 100 e 2000 ppm de Sr e abaixo de 0,2% de MnO, se tratando de dados primários, corroborando com o que foi observado em campo. Existem 3 passagens na estratigrafia do grupo na SRC que os valores de Sr excedem os 2000 ppm (carbonatos primários preservados).

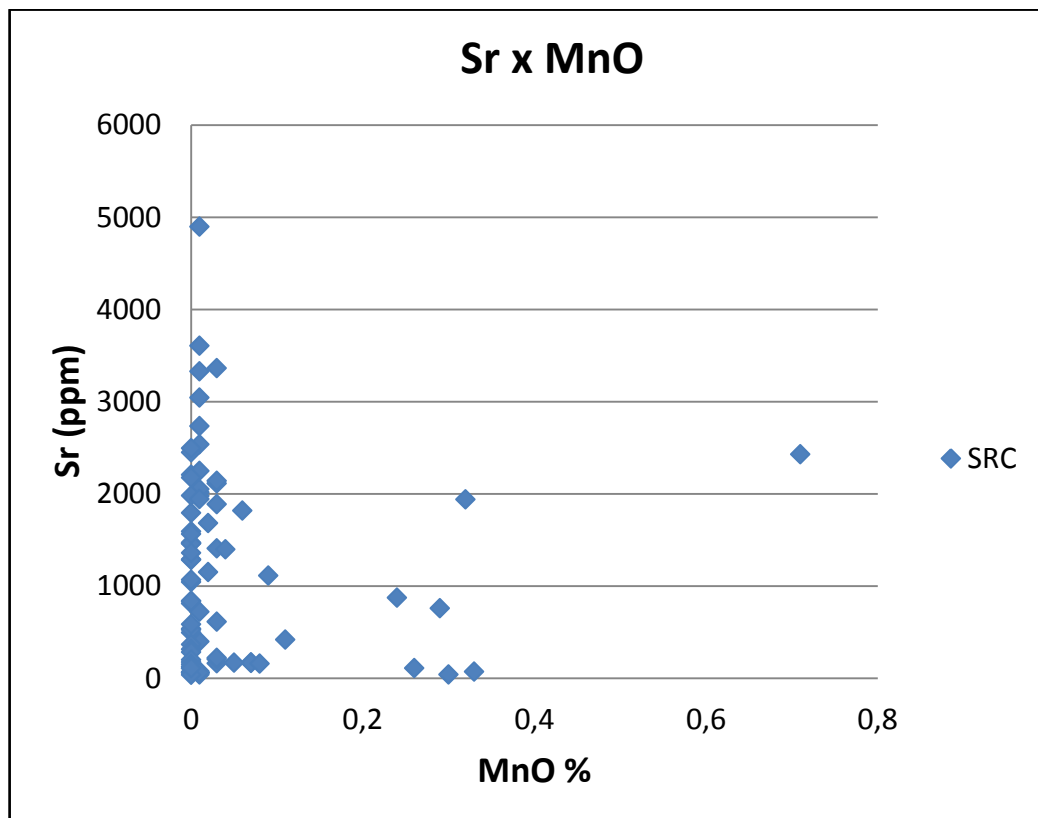


Figura 14 – Gráfico de dispersão Sr x MnO

A individualização dos dolomitos e calcários dolomíticos foi simplificada com auxílio do gráfico de dispersão MgO x CaO (Fig.15). As amostras com valores acima da linha vermelha são enriquecidas em MgO (> 10%), portanto se tratam de rochas que apresentam em seu arcabouço o mineral dolomita em grande quantidade. Os valores mais elevados para a razão MgO/CaO giram em torno de 0,60 a 0,76 para os dolomitos estromatolítico do grupo Paranoá e trechos do pacote dolomítico da formação Sete lagoas (tab. 4).

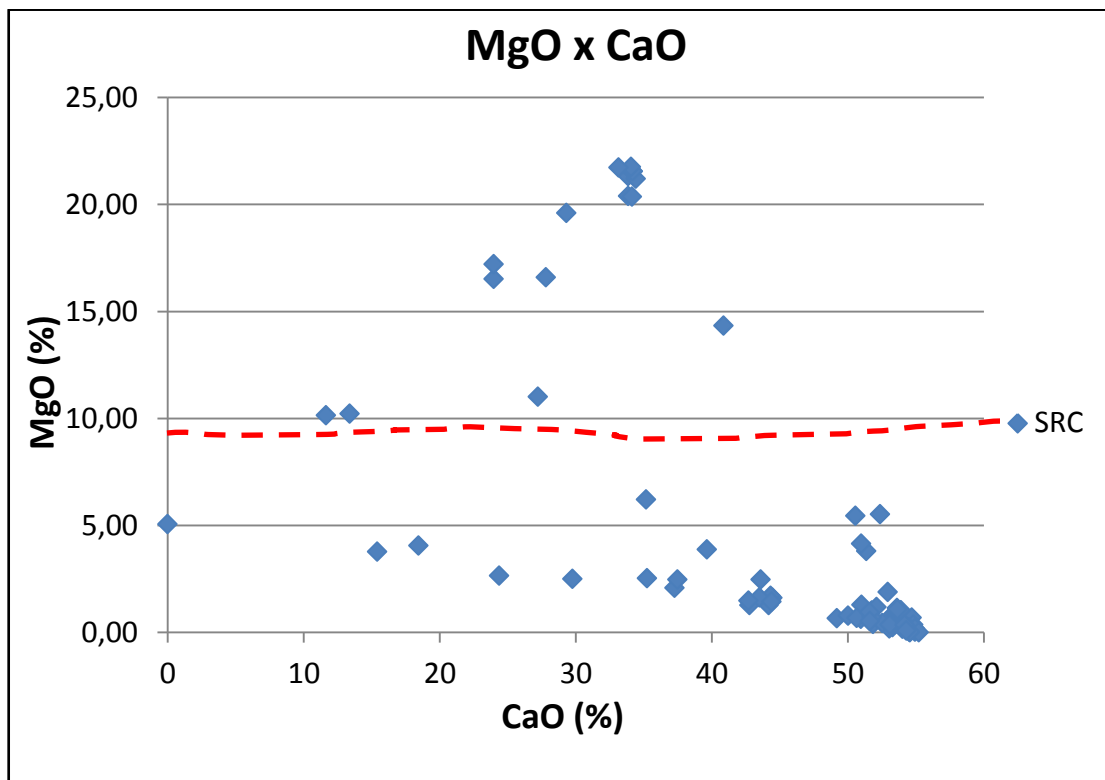


Figura 15 – Gráfico de dispersão MgO x CaO nas amostras da SRC. Em vermelho limite calcário e dolomitos.

Tanto os dados isotópicos de C e O, da SRC levantados neste trabalho, quanto os dados do poço 1-RC-01-GO (Tonietto, 2011) são compatíveis com os encontrados no Grupo Bambuí (Fig.16). Os valores  $\delta^{13}\text{C}$  para a SRC variam em torno de -0,86 a 14,46‰, já os valores para as amostras do poço 1-RC-01-GO variam de -5,464 a 11,956‰ (Tonietto, 2011). Em ambos os casos são encontrados valores negativos (-5,464 a -0,86‰) para os isótopos de C, nos carbonatos basais do grupo Bambuí.

Quando lançados em um gráfico de dispersão os dados obtidos de  $\delta^{18}\text{O}$  com os de  $\delta^{13}\text{C}$  (Fig.16) fica claro que a seção SRC apresenta valores levemente mais positivos em relação ao poço 1-RC-01-GO. Além disso, o gráfico mostra que após o evento de dolomitização da formação Sete Lagoas as fácies carbonáticas ficam enriquecidas em  $\delta^{13}\text{C}$ . Já os valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$ , referentes às amostras da base da formação Sete Lagoas, podem estar associados a baixa produção microbiana (Kuchenbecker, 2011), ou mesmo a associação com os carbonatos de capa, pois valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  são encontrados nos carbonatos pós glaciação da base do grupo Bambuí.

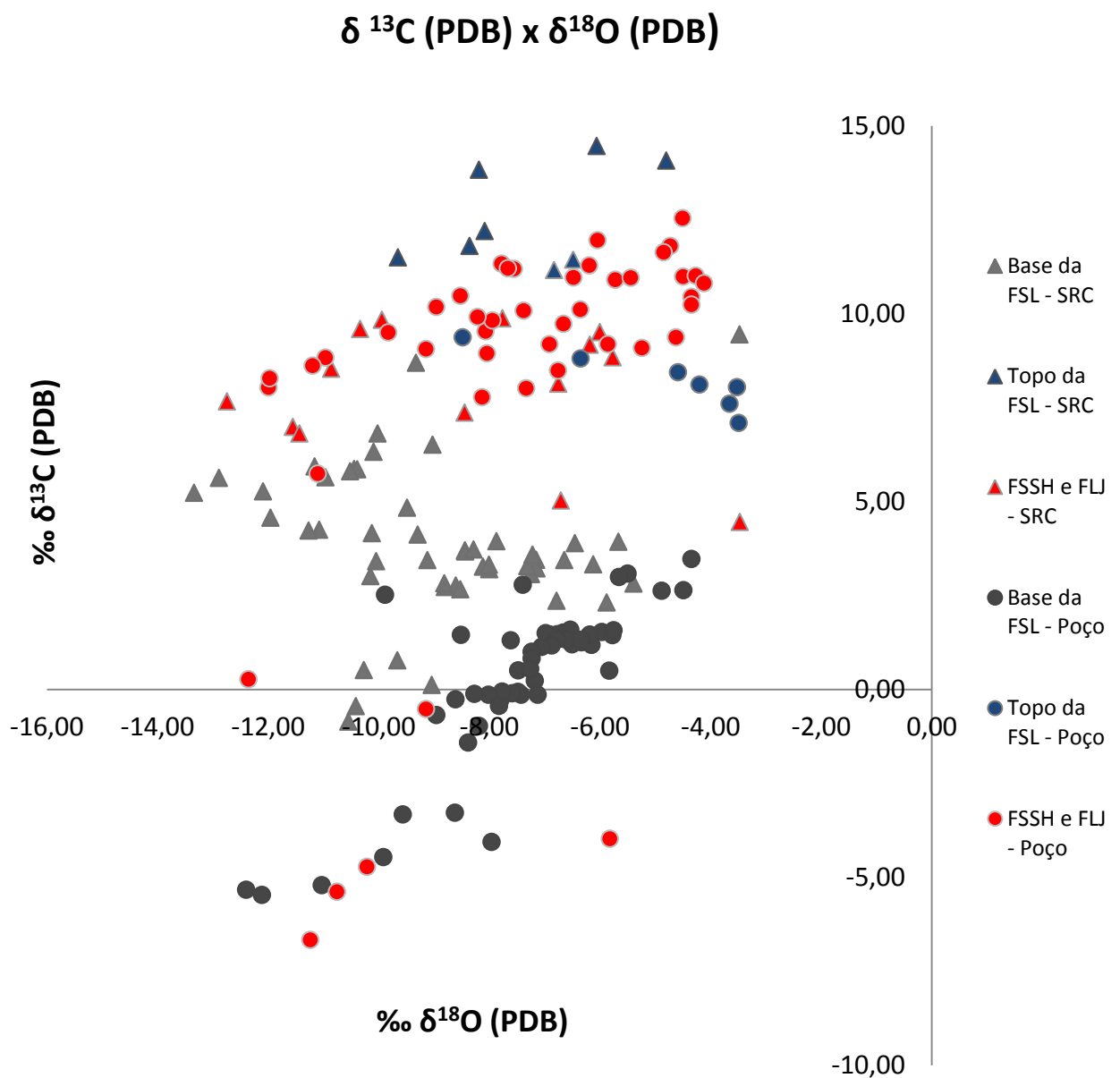


Figura 16 – Gráfico de dispersão  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) x  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB) da seção do ribeirão Caldeira - SRC com o poço 1-RC-01-GO (Tonietto, 2011). FSL – formação Sete Lagoas; FSSH – formação Serra de Santa Helena; FLJ – formação Lagoa do Jacaré.

Os valores médios de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtidos para SRC (tab. 4) foram de  $0,707658 \pm 1$  a  $0,708592 \pm 2$ , para as 6 amostras analisadas (valores acima de 1000 ppm de Sr). Quando lançados numa curva de variação isotópica da água do mar, durante os últimos 1000 Ma da história da Terra (Halverson et al. 2007), sugerem idade de sedimentação dos carbonatos em torno de 700 a 600 Ma (Fig.17), o que comporta o final do período Criogeniano até o Ediacarano. As amostras selecionadas pertencentes a formação Sete Lagoas apresentam valores mais baixos ( $0,707683 \pm 2$  e  $0,707658 \pm 1$ ). Já os valores mais elevados (de  $0,708592 \pm 2$  a  $0,707907 \pm 2$ ) foram obtidos para a Formação Lagoa do Jacaré, confirmando a estratigrafia do grupo (Fig. 17).

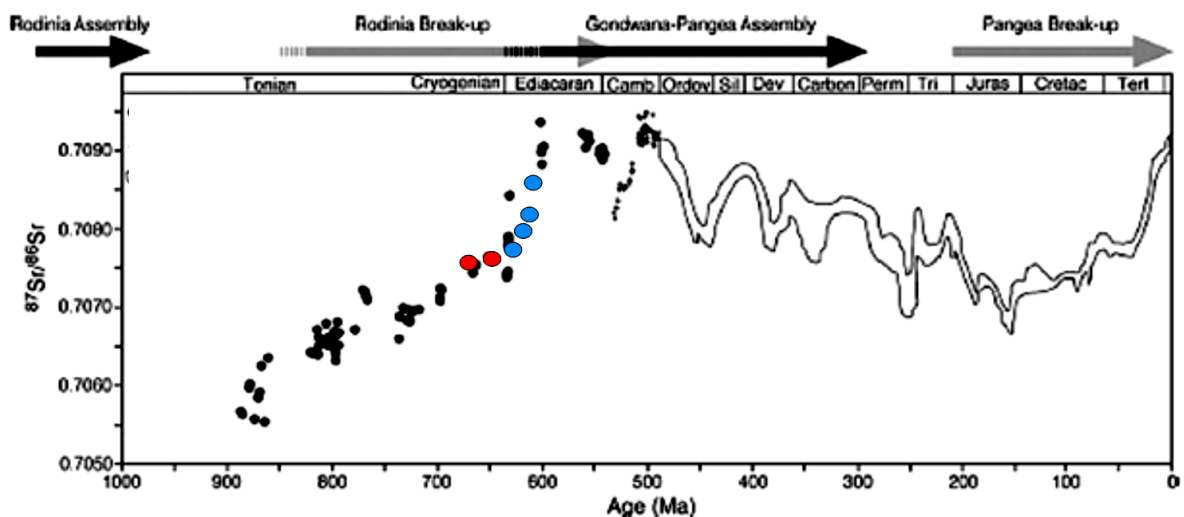


Figura 17 – Curva com evolução da razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  a partir da assembleia do supercontinente Rodínia até o presente (Halverson et al. 2007). Círculo em vermelho - Formação Sete Lagoas da SRC. Círculo em azul - Formação Lagoa do Jacaré da SRC.

## 6.8. Evolução Estratigráfica do grupo Bambuí na SRC

### 6.8.1. Introdução

Com empilhamento estratigráfico realizado ao longo do Ribeirão Caldeira (SRC), foi elaborado um perfil composto (Fig.18) para o Grupo Bambuí na região. Os perfis SRC-1, SRC-2, SRC-4, SRC-6 e SRC-7 compõem a SRC, que ao todo atinge 750 m de rochas.

Para as interpretações com base na moderna estratigrafia de sequências (Catuneanu, 2006 e Catuneanu et. al, 2009), foram utilizadas ideias de Martins-Neto, 2007, colocando todo pacote pelito-carbonática do grupo Bambuí como uma megassequência de primeira ordem. Além disso, algumas premissas foram adotados para hierarquização das sequências, considerando também a sua evolução isotópica (C e O). Assim foi definido que: Mudanças paleogeográficas (ex. Paleogeografia marinha rasa para marinha distal) representam variações de 2ª ordem (Raja Gabaglia et. al., 2007, Santana, 2009). Mudanças de ambientes deposicionais (ex. bancos carbonáticos para lagunas) marcam variações de 3ª ordem (Raja Gabaglia et. al., 2007, Santana, 2009). Mudanças de elementos arquiteturais dentro de um mesmo ambiente deposicional marcam variações de 4ª ordem (Raja Gabaglia et. al., 2007, Santana, 2009).

Essas variações de 2º, 3º e 4º ordens foram interpretadas com base no modelo das sequências T-R (sensu Embry & Johannessen, 1992), com adaptações na nomenclatura das superfícies chave. A aplicação de outros modelos de sequências, para o grupo Bambuí, pode ser observado em Martins & Lemos, 2007 e Vieira et al., 2007.

#### 6.8.2. Discussão

O embasamento da sequência pelito-carbonática do grupo Bambuí na região da serra de São Domingos, não são os diamictitos e rochas associadas da formação Jequitaí. Na região, os dolomiticos estromatolíticos do topo do grupo Paranoá ( fácies Doe e associação de fácies de recife estromatolítico) são o embasamento do grupo Bambuí, portanto foi importante fonte para a formação dos carbonatos da formação Sete Lagoas.

A passagem para a base do grupo Bambuí é marcada pela falha de São Domingos. Mudanças litológicas (de Calcarenito estromatolítico, para calcarenito laminado), de características tectônicas (intensamente tectonizada para levemente tectonizada) e a variação nos valores para  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$ , são os principais atributos que marcam esse contato. Foram encontrados valores positivos de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  (variando de

0,30 e 1,46‰) para o grupo Paranoá e valores negativos para o início do grupo Bambuí (variando de -0,86 e -0,45‰), de acordo com o que foi observado também por Santos et al. (2000) para a serra de São Domingos, Minas Gerais e Alvarenga et al. (2007), na região de Bezerra-Formosa, Goiás. A cronologia mostra a passagem do Mesoproterozóico (grupo Paranoá), para o Neoproterozóico (grupo Bambuí).

Os calcarenitos laminados com filmes de pelitos representam a base do grupo Bambuí e o início da sequência I (Fig. 18). Importante colocar que a unidade inferior da formação Sete Lagoas está incompleta nos afloramentos, pois a sua base foi cortada pela falha. Logo as suas primeiras descrições representam as unidades inferiores da formação Sete Lagoas, mas não é a sua base estratigráfica.

A geoquímica isotópica revela uma incursão negativa a levemente positiva de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  (de -0,86 a 0,77 ‰) para essas rochas. O motivo para esses valores anômalos gera dúvidas, se seriam fruto de uma influência glacial ou de fatores locais (alta salinidade, baixa atividade microbiana etc.).

Os depósitos carbonáticos sobrejacentes tem caráter mais proximal em relação aos anteriores, pois são poucos os momentos em que pelitos são depositados nessa porção da bacia. O predomínio é de um banco carbonático que atingem mais de 100 metros de espessura, com intercalações das fácies de calcarenito laminado (predomina) com calcarenito com níveis de pelito (fácies CIm).

O contexto regressivo é mantido, a ponto de expor à superfície os depósitos carbonáticos e modifica-los quimicamente (recristalização, dolomitização e silicificação subordinada). O produto final são cerca de 110 metros de rochas dolomitizadas com níveis silicificados, geradas num contexto mais restrito (associação de fácies de Laguna restrita e aberta).

A interpretação de que essas rochas foram em parte expostas a superfície, são corroboradas pela presença de estruturas de dissolução internas a rochas (vugs), por vezes preenchidos por sílica radial (Fig.12), indicando que o evento de dissolução (paleo-carste) foi anterior à percolação dos fluidos silicosos, assim como

sugerido também por Tonietto (2010), para o poço 1-RC-01-GO. Em termos de estratigrafia de sequências essas rochas marcam o final da sequência I do Grupo Bambuí (mas ainda dentro da formação Sete Lagoas), e em seu topo é marcada uma discordância subaérea - DS (Fig. 18).

Considerando as características porosas dessas rochas como possíveis reservatórios de gás natural, o topo da formação Sete Lagoas na região, passa a ser um bom alvo para teste na busca por hidrocarbonetos.

Após a exposição subaérea da plataforma, ocorre uma transgressão marcada pelo entalhamento de canais associados ao retrabalhamento por onda dos carbonatos, formando calcirruditos, calcarenitos oolíticos e calcarenitos ondulados representados pela associação de fácies de Canais de maré dominada por onda.

Essas rochas apresenta uma incursão positiva com valores elevados de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$ , variando de +14,46‰ a +11,46‰. Como a composição dessa unidade é predominantemente carbonática e são descritas estruturas e litologias típicas com marcas onduladas, estratificação ondulada truncada, níveis oolíticos e pacotes de calcirruditos, fazendo parte da plataforma do grupo Bambuí é considerado que o retrabalhamento foi devido a marés e ondas que iniciavam um contexto transgressivo, já que uma grande mudança litológica acontece no prosseguimento da seção. Esse pacote de aproximadamente 20 m de rochas iniciam a sequência II do grupo Bambuí na SRC e em seu topo é marcada uma superfície máxima regressiva - SMR.

Em seguida depósitos pelíticos representados pela fácies Plm passam a imperar na SRC. O que temos é a transgressão da formação Serra de Santa Helena com aproximadamente 100 m de espessura de siltitos, pelitos e arenitos muito fino. O pacote tem início com composição carbonática, mas logo lentes de arenito muito fino associado aos pelitos chegam à bacia. Importante que os carbonatos não são mais vistos, e fontes como os leques de assoalho (Fig. 13) são cogitadas como causadoras da entrada dos arenitos.

A interferência causada pela entrada de sedimentos siliciclásticos é finalizada, então os carbonatos da formação Lagoa do Jacaré começam a se formar. Inicialmente os calcarenitos com níveis oolíticos se intercalam com calcarenitos com níveis de pelitos. Posteriormente ocorrem como inundações gerando pacotes de pelitos carbonáticos de dezenas de metros, referente a pulsos regressivos de mais alta frequência (3º ordem). No final da formação um espesso banco de carbonatos retrabalhados se forma, confirmando o caráter regressivo regional do pacote (Fig. 18).

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  variam entre 7,0 a 9,5‰ aproximadamente (tab. 4). São normais quando comparados com os dados da bibliografia, para os carbonatos Neoproterozóico do grupo Bambuí (Alvarenga et al., 2007; Santos et al. 2000, Tonietto 2010, etc.).

Logo acima do banco carbonáticos no final da formação Lagoa do Jacaré, pelitos carbonáticos passam a preencher a bacia. O contato entre as fácies é brusco (SMR), o que temos é uma transgressão, desta vez representada pela formação Serra da Saudade. Foram mapeados mais de 400m de pelitos, com raras lentes de carbonatos. Posteriormente corpos de arenitos finos dão início a sedimentação da formação Três Marias, finalizando a sequência II do Grupo Bambuí.

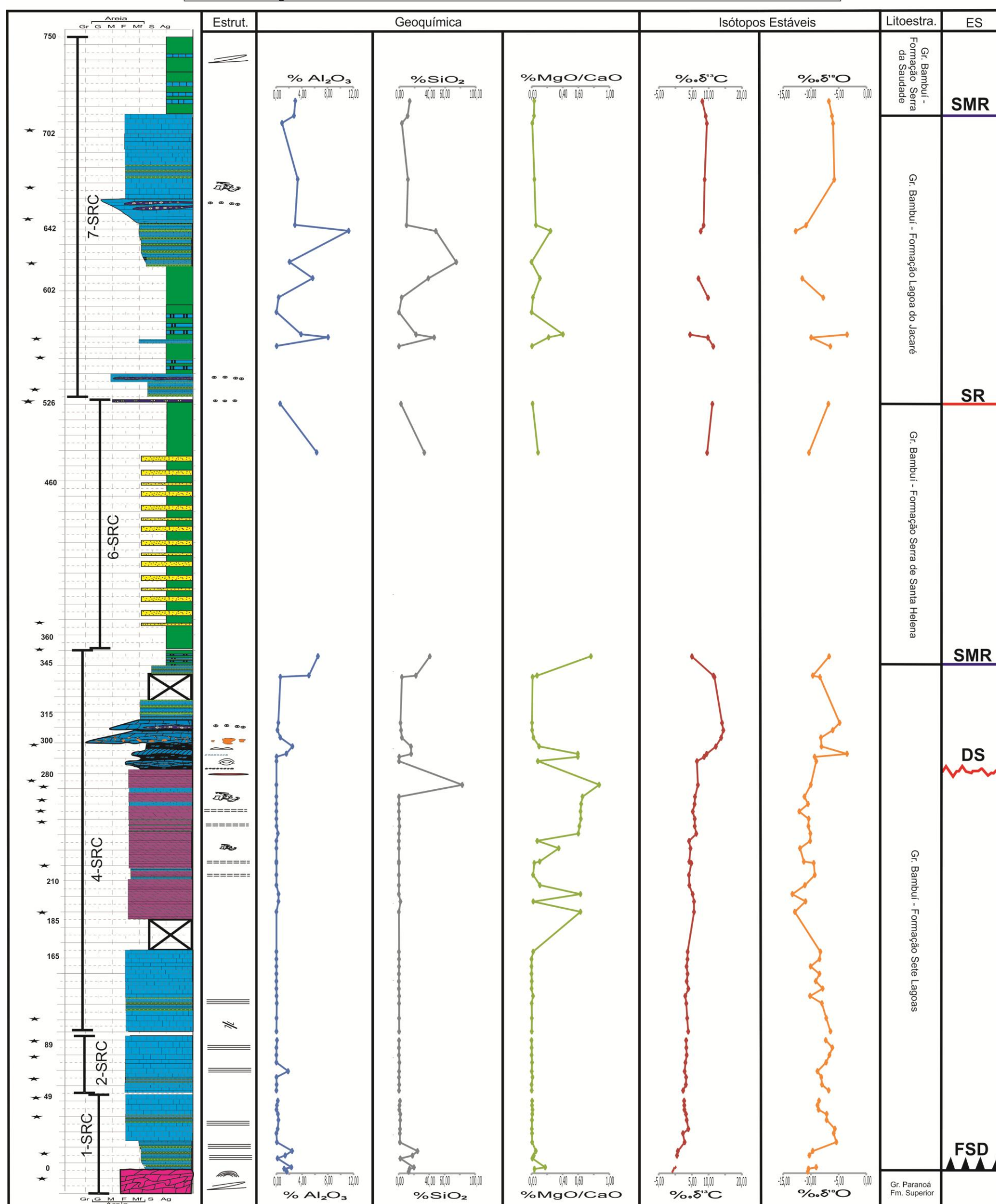
## **6.9. Associações Estratigráficas**

### **6.9.1. Introdução**

Considerando o modelamento estratigráfico elaborado para a seção Ribeirão Caldeira – SRC (nesse artigo), associado a o acervo de descrições detalhadas das fácies, de dados geoquímicos e isotópicos do poço 1-RC-01-GO (Clark & Fugita (2001), Misi (2001), Martins & Lemos (2007) e Tonietto (2010)), foi possível correlaciona-los regionalmente (distância de 50 km aproximadamente). A chave para a correlação foi a interpretação litofaciológica, associado à aplicação dos conceitos da moderna estratigrafia de sequências (Catuneanu et al. 2009), utilizando também dados de isótopos estáveis (C e O).



## Seção Ribeirão Caldeira - SRC Escala 1:1000



## Convenções:

- |                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| ..... laminação incipiente | ○ Oolitos                     |
| ⊕ vugs                     | ⌒ estromatólito colunar       |
| ⊘ microfalha               | ≡ Calcarenito Laminado        |
| ⌒ topo ondulado            | — Nível de sílica             |
| H Seção Estratigráfica     | ⋯ Granulos                    |
| ★ Lamina petrográfica      | ⋯ Clastos de lama carbonática |
| ⌒ Dobras                   | ⌒ Laminação Ondulada truncada |

## Fácies:

- |     |      |                           |
|-----|------|---------------------------|
| Doe | Dic  | Plc                       |
| Dlm | Cao  | Pla                       |
| Clm | Cacr | GAP                       |
|     | Plm  | FSD Falha de São Domingos |

## Estratigrafia de Sequências:

- |     |  |
|-----|--|
| DS  | Discordância Subaérea - Final da seqüência I do Grupo Bambuí |
| SMR | Superfície Máxima Regressiva                                 |
| SR  | Superfície Regressiva  |

Figura 18 – Seção Ribeirão Caldeira – SRC. A direita os valores de % para o CaO/MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ‰ para δ<sup>13</sup>C<sub>(PDB)</sub> e δ<sup>18</sup>O<sub>(PDB)</sub>. As associações de fácies, as unidades litoestratigráficas e interpretações com base na estratigrafia de seqüências também estão presentes.

Com o cruzamento dos dados de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  x  $\delta^{18}\text{O}_{(\text{PDB})}$  da SRC e do poço Rio Corrente (Tonietto 2010), ficou claro que os dados isotópicos registraram a mudança nas seqüências sedimentares (Fig. 19). Do início do grupo Bambuí até os dolomitos da base da formação Sete Lagoas os carbonatos apresentam valores entre -5,00 e +5,00‰  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB). Essas rochas representam a seqüência I (2º ordem) do grupo Bambuí. No segundo ciclo sedimentar de 2º ordem (seqüência II) os isótopos de C ( $\delta^{13}\text{C}$  - PDB) tem valores acima da primeira seqüência sedimentar, variando entre +5,00 e +15,00‰ (Fig. 19).

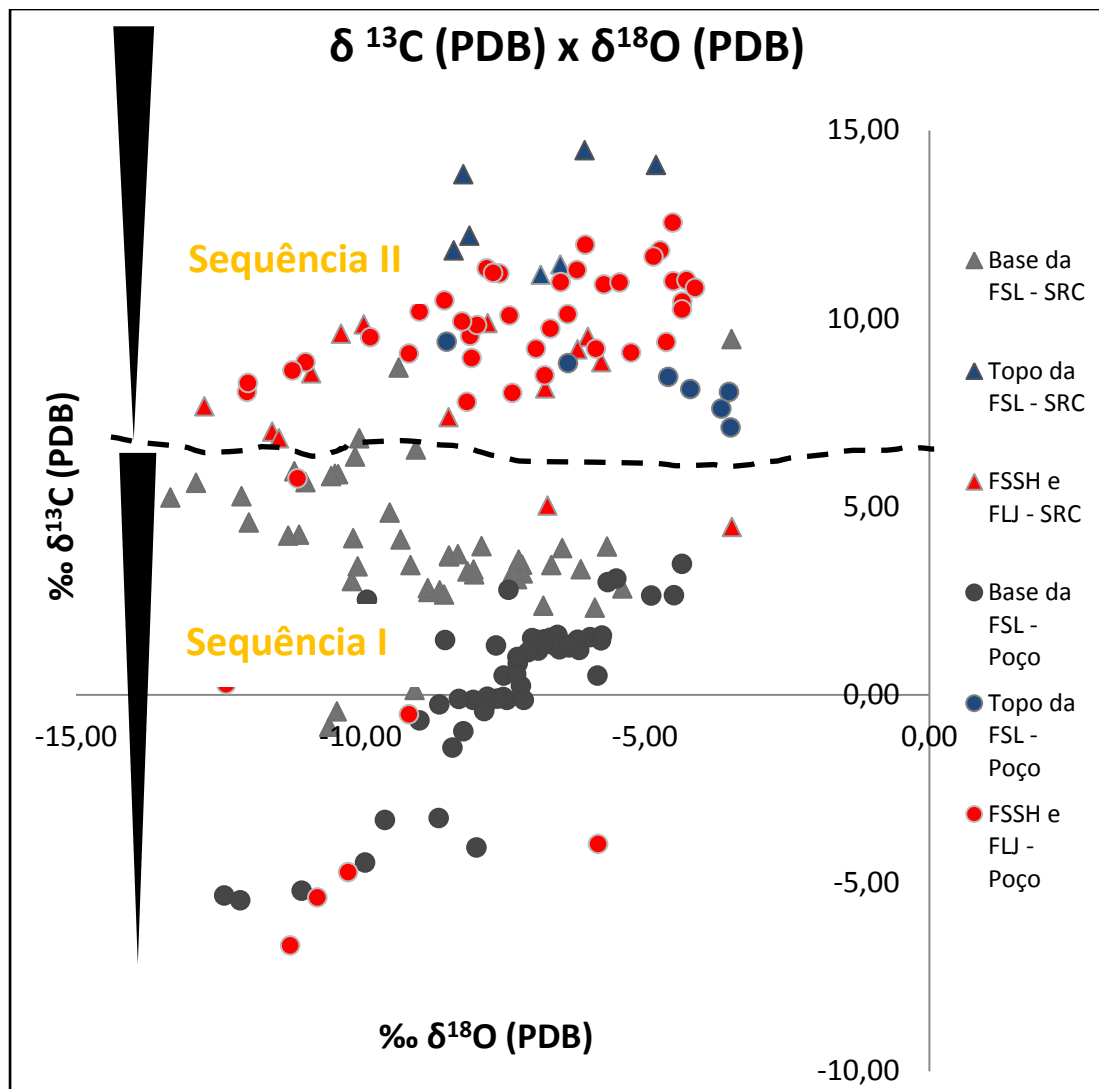


Figura 19 – Gráfico de dispersão  $\delta^{13}\text{C} \text{ (PDB)} \times \delta^{18}\text{O} \text{ (PDB)}$  da seção do ribeirão Caldeira - SRC com o poço 1-RC-GO (Tonietto, 2011). FSL – formação Sete Lagoas; FSSH – formação Serra de Santa Helena; FLJ – formação Lagoa do Jacaré. Linha tracejada preta marca a passagem da seqüência I para seqüência II (2º ordem) do grupo Bambuí.

Se considerarmos um valor médio de  $\delta^{13}\text{C}$  para cada sequência (I e II) do grupo Bambuí, vamos obter valores próximos de +4,00‰, para a sequência I e +9,00‰, para a sequência II. A paleogeografia e o momento climático pelo qual a Terra passou antes do início da sedimentação pelito-carbonática do grupo Bambuí (Terra em bola de neves) é o causador dessa diferença. Com o congelamento da superfície da terra o  $^{13}\text{C}$  ficou aprisionado na atmosfera fazendo com que os primeiros carbonatos formados fossem empobrecidos no isótopo pesado, atingindo valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  (carbonatos de Capa). No início da sedimentação do grupo Bambuí na SRC e no poço 1RC-01-GO são registrados valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  e à medida que a sedimentação avança na sequência I, os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  vão subindo gradativamente até atingir valores máximos. Na sequência II a normalidade no ciclo do carbono vai sendo reestabelecida, pois os carbonatos passam a aprisionar mais o  $^{13}\text{C}$ .

#### 6.9.2. Sequência I

A correlação tem início com os dolomitos da base do grupo Paranoá presente em ambas as seções correlacionadas. Inicialmente o hiato deposicional deu um caráter de discordância para essa superfície – DS. Só que o retrabalhamento transgressivo fruto do avanço do mar Bambuí, deu uma nova identidade para essa superfície, passando SMR. Como se trata da mudança do Mesoproterozóico para o Neoproterozóico e variações de nível continental são interpretadas como 1º ordem (Martins-Neto, 2007) (Fig. 20).

A secção neoproterozóica se inicia com pacotes de calcarenito intercalados com pelitos carbonáticos de valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  (na SRC e no poço 1-RC-1-GO). Os perfis apresentados para o poço 1-RC-1-GO (Tonietto, 2010) têm rochas mais lamosas e sua espessura é maior. Somado a isso os dados de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  são mais anômalos, chegando a valores abaixo de -5‰ (Tonietto, 2010). Na SRC a verdadeira espessura de pacote inicial é mascarada pela falha de São Domingos, porém pode-se admitir que sua espessura final fosse inferior ao do poço, pois logo os valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  (característicos do momento deposicional) somem.

Esses valores anômalos, na base do grupo Bambuí, quase sempre são atribuídos a carbonatos de capa, porém por falta de evidências sedimentológicas e por não ocorrerem registros de rochas glaciais nessa porção da bacia, tais rochas não pertence a essa classe. Contudo tais valores negativamente anômalos podem estar ligados a um momento de transição entre os carbonatos de clima frio com os carbonatos de águas tropicais.

Após a deposição do pacote de calcarenitos intercalados com pelitos, uma espessa camada de carbonatos preenche a bacia precursora do grupo Bambuí. Sua espessura chega a aproximadamente 100m na SRC e quando comparado aos dados do poço 1-RC-1-GO verifica-se uma espessura da ordem de 350m. Esse pacote é tido como regressivo (3º ordem), pois diminui a quantidade de pelitos associados aos carbonatos e são registradas corpos oolíticos

O contexto regressivo é mantido e um limite de sequência (2º ordem), pode ser correlacionado nas duas seções (Fig. 20). O topo da sequência I é representado por rochas dolomíticas esbranquiçadas ( fácies Dlm e Dic), fruto da exposição subaérea das rochas carbonáticas anteriormente descritas (Fig. 13). Tal feição é interpretada como o paleo-carste do grupo Bambuí (Dardenne, 1978; Martins, 1999; Tonietto, 2011). As principais características que levam a essa interpretação são: a presença de zonas com grande quantidade de poros no topo do pacote dolomítico (vugs), internos a rocha; preenchimento das cavidades de dissolução por sílica radial, no topo do pacote dolomítico, apontando que a percolação dos fluidos foi ainda no Neoproterozóico; a correlação regional da SRC com o poço (encontrado nas duas seções correlacionadas). As rochas dolomíticas do topo dessa sequência apresentam uma espessura da ordem de 100 metros na SRC, valor ligeiramente maior que o do poço 1-RC-1-GO.

Como rochas dolomíticas foram encontradas em um trend de 50 km aproximadamente (do poço até a SRC), uma vasta área para possíveis acumulações de hidrocarbonetos é aventada no topo da formação Sete Lagoas. Com o modelo estratigráfico da área definido e considerando que as rochas do grupo Bambuí são tectonizadas em partes, fica norteada a busca por uma situação em que todos os

fatores contribuíram para a formação da trapa de hidrocarboneto com acumulações viáveis econômica e tecnologicamente.

Em termos de estratigrafia de sequências, o pacote dolomítico tem no contato basal uma superfície regressiva – SR de 3º ordem (mudanças de ambientes deposicionais dentro de uma mesma formação litoestratigráfica). Porém o topo do pacote de dolomitos uma discordância subaérea - DS regional é esculpida, dando por fim a sequência I do grupo Bambuí (2º ordem) (Fig.20).

### 6.9.3. Sequência II

A Sequência II do grupo Bambuí na área estudada se inicia com fluxos de alta energia que dão origem a depósitos de calciruditos. São descritos calcarenitos com níveis de calciruditos e calcarenito com marcas onduladas ( fácies - Cacr), acima do pacote dolomítico no final da formação Sete Lagoas. A estratigrafia mostra que os depósitos são transgressivos, pois recobrem dolomitos com feições de exposição subaérea. Os dados isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  mostram valores muito elevados na SRC, variando de 14,46‰ e 11,46‰, para o poço os valores são mais baixos variando entre 7,094‰ e 9,374‰. Em comparação com os depósitos dolomíticos anteriormente descrito é observado um aumento brusco dos valores de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$ . Esse grupo de rochas separa os depósitos de mar raso com os depósitos de mar profundo, que sucedem o pacote carbonático.

Os depósitos de mar profundo aparecem inicialmente alternando pelitos com calcarenitos finos laminados, mas logo se tem o predomínio completo dos pelitos. Uma nova superfície máxima regressiva – SMR é observada na correlação no topo dos carbonatos (Fig. 20). A passagem abrupta de carbonatos para pelitos, evidenciando uma transgressão brusca regional (2º ordem), dá início a formação Serra de Santa Helena nessa porção da bacia. Inicialmente os pelitos são de composição carbonática, mas posteriormente, pacotes de arenito muito fino (centimétricos), associado com os pelitos negros, dominam a SRC, até a chegada de novo pulso carbonáticos (formação Lagoa do Jacaré) à bacia (Fig. 20).

Em seguida, com a chegada dos sedimentos carbonáticos e a mudança de no contexto paleogeográfico regional (associação de fácies de pelitos de borda de plataforma para bancos carbonática) é marcada uma superfície regressiva – SR de 2º ordem. Na SRC a regressão coloca bancos oolíticos acima (contato brusco) de pelitos marinhos distais. No poço o pulso carbonáticos se inicia com um banco de aproximadamente 50m de calcarenitos desenvolvidos também acima dos pelitos.

A correlação desse novo ciclo carbonático é marcada por transgressões de mais alta frequência, formando pacotes de pelitos carbonáticos em ambas as seções (Fig. 20). Esses ciclos marcam mudanças dentro de um mesmo contexto paleogeográfico o que os torna de 3º ordem. Finalizando a correlação um banco carbonático se forma na SRC, ao comparar com as rochas do poço o que temos são vários corpos menores de carbonato com maior quantidade de pelitos.

As constantes variações T-R de 3º ordem são finalizadas por uma transgressão, que da inicio a deposição dos pelitos da formação Serra da Saudade. Essa ultima formação não é descrita no poço 1RC-01-GO, isto porque o poço teve a sua perfuração iniciada sobre os afloramentos de calcários da formação Lagoa do Jacaré e assim é dada por fim a correlação.

### **6.10. Conclusões**

Com os trabalhos realizados na seção do Ribeirão Caldeira (SRC) foi possível individualizar nove fácies sedimentares e sete associações de fácies que compunham a plataforma carbonática em rampa do grupo Bambuí.

As seguintes fácies foram individualizadas: Dolomito Estromatolítico – Doe; Calcarenito Laminado – Clm; Calcarenito/Dolarenito Oolítico – Cao; Dolarenito Laminado – Dlm; Dolomito “Cristalino” – Dic; Pelito Laminado – Plm; Pelito com lentes de Arenito – Pla; Pelito com lentes de Carbonato – Plc e Calcarenito com níveis de Calcirudito – Cacr, que dão origem as associações fácies de Recife estromatolítico de Laguna Restrita e Aberta, de Bancos Oolíticos, de Canais de Maré Dominado por Onda, de Bancos Carbonáticos, de Pelitos de Borda de Plataforma e de Pelitos Marinhos.



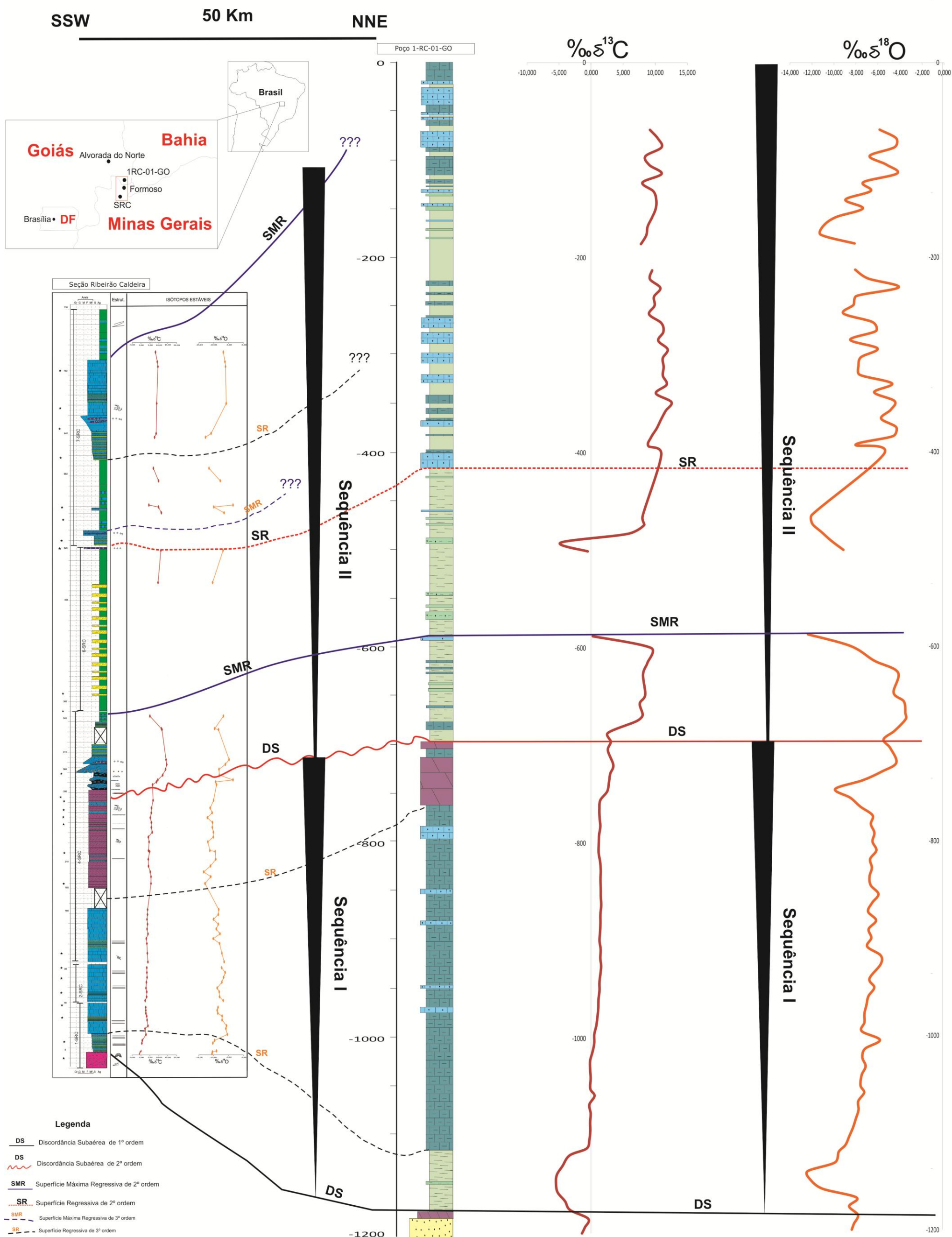


Figura 20 – Correlação regional da Seção Aflorante (SRC) com o poço 1RC-01-GO. A direita das seções perfis de  $\delta^{13}C$ (PDB) e  $\delta^{18}O$  (PDB) Utilizar legenda apresentada na Fig.13 para as litologias

Um bloco diagrama (Fig. 13) com um modelo paleogeográfico para o momento da carstificação da plataforma carbonática da formação Sete Lagoas é proposto nesse trabalho, baseado principalmente em modelo de plataformas fanerozóicas.

A existência de espessa camada de dolomitos com representação regional (presente na SRC e no poço), associados a cavidades de dissolução internas a rocha no topo do pacote dolomítico e sílica radial preenchendo vazios, foi interpretada como oriundos de um paleo-carstes neoproterozóicos do grupo Bambuí (sugerido também por Tonietto 2010).

Um bom reservatório de hidrocarbonetos associado a esse modelo exploratório pode ser considerado com, base nessas interpretações acima descritas e devido ao fato de serem encontradas em ambas as seções correlacionadas. Pode ser especulado um trend de 50 km de rochas com tais características.

As análises isotópicas mostraram que existe uma anomalia negativa em  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  na base do grupo Bambuí, tanto no poço quanto na SRC. Uma grande diferença nos valores de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  é observada entre as sequências I e II. Isso se deve ao fato do aprisionamento do  $^{13}\text{C}$  na atmosfera durante a glaciação do início do grupo Bambuí.

Com a aplicação da estratigrafia de sequências foi possível individualizar duas sequências T-R de 2º ordem e inúmeras de mais alta frequência (3º e 4º ordens) dentro das seções correlacionadas. Ficou claro que o pacote dolomítico põe fim a sequência I, mas não a unidade litoestratigráfica do grupo Bambuí, que termina nos depósitos transgressivos sobrejacentes (formação Sete Lagoas). Novos dados, considerando outros levantamentos regionais, associados aos marcos estratigráficos aqui discutidos, auxiliarão em futuras interpretações para a evolução do grupo Bambuí.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grupo Bambuí a leste da falha de São Domingos, no extremo norte do estado de Minas Gerais, apresenta geologia onde é possível observar momentos marcantes (exposições, inundações, retrabalhamento, etc.), que se tornam verdadeiros marcos na estratigrafia do grupo. Essa evolução pode ser observada tanto em afloramentos rochosos, bem preservados, seguindo o curso do ribeirão Caldeira (SRC), próximo a fazenda homônima, quanto no poço exploratório 1-RC-01-GO. Essas seções (SRC e poço) se tornam uma maneira muito didática de se comparar dados de superfície com dados de subsuperfície. A aplicação da moderna estratigrafia de sequências associando dados isotópicos, também se desenrola de forma muito didática nessa correlação.

Para entendimento do contexto e das técnicas geológicas aplicadas nessa dissertação, foram elaborados capítulos introdutórios (geologia regional, estratigrafia de sequências e isótopos) com o intuito de elucidar as ideias dos leitores sobre os temas aqui abordados. Posteriormente com os levantamentos de campo e correlações com dados do poço foi confeccionado um artigo a ser submetido para publicação de cunho internacional.

Estudos mais detalhados com isótopos radiogênicos (Sm/Nd e U/Pb) ajudariam no entendimento da evolução da bacia na área de estudo (leste da falha de São Domingos). Associado a isso um melhor posicionamento geocronológico, além da proveniência dos sedimentos seriam mais bem elucidadas. A geoquímica de terras raras também pode ser utilizada em trabalhos futuros, com intuito de melhor entender a gênese das porções pelíticas, principalmente (Kuchenbecker, 2011).

Com os trabalhos realizados na seção do Ribeirão Caldeira (SRC) foi possível individualizar nove fácies sedimentares e sete associações de fácies que compunham a plataforma carbonática em rampa do grupo Bambuí.

As seguintes fácies foram individualizadas: Dolomito Estromatolítico – Doe; Calcarenito Laminado – Clm; Calcarenito/Dolarenito Oolítico – Cao; Dolarenito

Laminado – Dlm; Dolomito “Cristalino” – Dic; Pelito Laminado – Plm; Pelito com lentes de Arenito – Pla; Pelito com lentes de Carbonato – Plc e Calcarenito com níveis de Calcirudito – Cacr, que dão origem as associações fácies de Recife estromatolítico de Laguna Restrita e Aberta, de Bancos Oolíticos, de Canais de Maré Dominado por Onda, de Bancos Carbonáticos, de Pelitos de Borda de Plataforma e de Pelitos Marinhos.

Um bloco diagrama (Fig. 13) com um modelo paleogeográfico para o momento da carstificação da plataforma carbonática da formação Sete Lagoas é proposto nesse trabalho, baseado principalmente em modelo de plataformas fanerozóicas.

A existência de espessa camada de dolomitos com representação regional (presente na SRC e no poço), associados a cavidades de dissolução internas a rocha no topo do pacote dolomítico e sílica radial preenchendo vazios, foi interpretada como oriundos de um paleo-carstes neoproterozóicos do grupo Bambuí (sugerido também por Tonietto 2010).

Um bom reservatório de hidrocarbonetos associado a esse modelo exploratório pode ser considerado com, base nessas interpretações acima descritas e devido ao fato de serem encontradas em ambas as seções correlacionadas. Pode ser especulado um trend de 50 km de rochas com tais características.

As análises isotópicas mostraram que existe uma anomalia negativa em  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  na base do grupo Bambuí, tanto no poço quanto na SRC. Uma grande diferença nos valores de  $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})}$  é observada entre as sequências I e II. Isso se deve ao fato do aprisionamento do  $^{13}\text{C}$  na atmosfera durante a glaciação do início do grupo Bambuí.

Com a aplicação da estratigrafia de sequências foi possível individualizar duas sequências T-R de 2º ordem e inúmeras de mais alta frequência (3º e 4º ordens) dentro das seções correlacionadas. Ficou claro que o pacote dolomítico põe fim a sequência I, mas não a unidade litoestratigráfica do grupo Bambuí, que termina nos

depósitos transgressivos sobrejacentes (formação Sete Lagoas). Novos dados, considerando outros levantamentos regionais, associados aos marcos estratigráficos aqui discutidos, auxiliarão em futuras interpretações para a evolução do grupo Bambuí.

## 8. REFERÊNCIAS

- Aharon, P., 2005. Redox stratification and anoxia of the early Precambrian oceans: implications for carbon isotope excursions and oxidation events. *Precambrian Research* 137, 207-222.
- Alkmim, F.F & Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: C.P. Pinto, M.A. Martins-Neto (Eds). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG MG, Belo Horizonte, p. 9-30.
- ALKMIM, F. F.; CHEMALE JR, F.; ENDO, I. . A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 48, n. 1, p. 14-31, 1996.
- Alkimim, F.F., Brito Neves, B.B., Alves, J.A.C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – uma revisão. In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A. (Eds). *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG / Núcleo BA / SE/ SGM / CNPq. p 45 – 62. 1993.
- Allan J.R. & Mattheus R.K. 1982. Isotope signature with early meteoric diagenesis. *Sedimentology*, 29:797-817.
- Allégre C.J., 2008. *Isotope Geology*; translated by Christopher Sutcliffe. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 978-52186-228-8, 512 pages.
- Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Neves, B. B. B.; Fuck, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, v. 17, p. 1-29, 1981.
- Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B.; Fuck, R. A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *Atas. 8o Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande, Recife, SBG/NNE*, p. 363 – 391.
- ALVARENGA, C. J. S.; GIUSTINA, M. E. Schutesky Della; SILVA, N. G. C. DA SANTOS, R. V.; GIOIA, Simone M. C. L.; GUIMARÃES, E. M.; DARDENNE, M. A.; SIAL, A. N.; Ferreira, V.P.. Variações dos isótopos de C e Sr em carbonatos pré e pós-glaciação Jequitai (Esturtiano) na região de Bezerra-Formosa, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37supl, p. 147-155, 2007.
- Alvarenga, C.J.S. 1978. *Geologia e Prospecção geoquímica dos grupos Bambuí e Paranoá na Serra de São Domingos – MG*. Dissertação de Mestrado, IG-UnB.
- Alvarenga, C.J.S & Dardenne M.A. 1978. *Geologia dos grupos Bambuí e Paranoá na Serra de São Domingos – MG*. Congresso brasileiro de geologia, p. 546 – 556.

- Amaral, G. & Kawashita, K. 1967. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 21, Curitiba, Anais..., 214-217p.
- Araújo Filho J.O. de. 1999 b. A Sintaxe dos Pirineus: um exemplo de dois cinturões Brasileiros no centro oeste do Brasil. In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste; 7 Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 10, Boletim de Resumos, 79.
- Araújo Filho J O de. 1980. The geology of the Pirineus Megainflexion, Goiás, Central Brazil. In: Geowissenschaftliches Lateinamerika Kolloquium, 7, Kurzfassungen, 9-11. Heidelberg.
- Babinski, M. 1993. Idades isocrônicas Pb/Pb e geoquímica isotópica de Pb das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, na porção sul da Bacia do São Francisco. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia associada à Univ. de São Paulo, São Paulo, 133p.
- Baker P.A., Gieskes J.M., Elderfield H. 1982. Diagenesis of carbonates in deep-sea sediments: evidence from Sr/Ca ratios and interstitial dissolved Sr<sup>2+</sup> data. *Journal of Sedimentology and Petrology*, 52:71–82.
- Banner J.L. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to Earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 65:141-194.
- Barbosa, J. S. F., Sabaté, P., Marinho, M. M. O Cráton do São Francisco na Bahia: uma Síntese. *Revista Brasileira Geociências*. V. 33, p. 3-6, 2003.
- Barbosa, O. 1965. Série Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 19, Rio de Janeiro, Anais..., 15 p.
- Braun, O.P.G. 1968. Contribuição à estratigrafia do Bambuí. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 22, Anais., Belo Horizonte, SBG., p 154-166.
- Bonhomme, M.G. 1976. Minéralogie des fractions fines et datation rubidium-strontium dans le Groupe Bambuí, MG, Brésil. *Rev.Bras. Geoc.*, 6(4): 211-222.
- Burke W.M., Denison R.E., Hetherington E.A., Koepnick R.B., Nelson M.F., Omo J.B. 1982. Variations of seawater <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr throughout Phanerozoic time. *Geology*, 10: 516–519.
- Catuneanu, O. Sequence Stratigraphy of clastic systems; concepts, merits and pitfall. *Journal of African Earth Sciences*. n.35. p. 1-43. 2002.

- Catuneanu, O., Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier, Amsterdam. p. 375, 2006.
- Catuneanu, O., V. Abreu , J.P. Bhattacharya , M.D. Blum , R.W. Dalrymple , P.G. Eriksson , C.R. Fielding , W.L. Fisher , W.E. Galloway , M.R. Gibling , K.A. Giles , J.M. Holbrook , R. Jordan , C.G.St.C. Kendall , B. Macurda , O.J. Martinsen , A.D. Miall , J.E. Neal , D. Nummedal , L. Pomar , H.W. Posamentier, B.R. Pratt , J.F. Sarg , K.W. Shanley , R.J. Steel , A. Strasser , M.E. Tucker , C. Winker., Towards the standardization of sequence stratigraphy. Earth-Science Reviews- Elsevier. p. 33. 2009.
- Chang, H.K., Kawashita, K., Alkmim, F.F., Moreira, M.Z. 1993. Considerações sobre a estratigrafia isotópica do Grupo Bambuí. Anais 2º Simpósio do Cráton do São Francisco, SBG, 195-196.
- Chang, H.H, Miranda, F.P., Magalhães, L., Alkmim, F.F. 1988. Considerações sobre a evolução tectônica da Bacia do São Francisco. In: SBG, Congr. Brás. Geol., 35, Belém, 1988. Anais..., Belém, v.5, p. 2076-2090.
- Clark J.G. & Fugita A.M. 2001. Recursos energéticos da Bacia do São Francisco: hidrocarbonetos líquidos e gasosos. In: Pinto C.P., Martins-Neto M.A. (eds.) Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte (SBG/MG), p. 265-284.
- Corfield R.M. 1994. Paleocene oceans and climate: An isotopic perspective. Earth Science Review, 37: 225-252.
- COSTA, L.A.M. & ANGEIRAS, A.G. 1971. Geosynclinal Evolution in the Epi-Baikalian Plataform of Central Brazil: Geol.Rund. 60(2): 1024-1050.
- Costa, M.T. & Branco, J.J.R. 1961. Roteiro de Excursão Belo Horizonte-Brasília. In: XIV Congresso Brasileiro de Geologia, V. 15: 9-25. Belo Horizonte.
- Cruz, S.C.P., A Interação Tectônica entre o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuai-Oeste Congo. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP. 503 p. 2004.
- Dardenne, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Tomas Filho, A. and CAMPOS, D.A., Editors, 2000. Tectonic Evolution of South America. Proceedings of the XXXI International Geological Congress (Rio de Janeiro), pp.231-263.

- Dardenne M.A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. In: SBG, Simp. cráton São Francisco, 1, Anais, p.104-157.
- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congr. Bras. Geol.,30, Anais, v. 2, p. 97-610.
- Embry, A.F., Johannessen, E.P., 1992, T–R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic- Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: Vorren, T.O., Bergsager, E., Dahl-Stamnes, O.A., Holter, E., Johansen, B., Lie, E., Lund, T.B. (Eds.), Arctic Geology and Petroleum Potential, vol. 2 (Special Publication). Norwegian Petroleum Society (NPF), pp. 121–146.
- Fuck R.A., Pimentel M.M., Soares J.E.P., Dantas E.L. 2005. Compartimentação da Faixa Brasília. In: SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 9, Atas, p. 26-27.
- Fuck, R.A. (1994) “A Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica na Província Tocantins” 4º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Anais, p.184-187.
- Fuck, R.A., Jardim de Sá, E.F., Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Soares, A.C.P. 1993 - As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: Síntese dos conhecimentos. In J.M.L. Dominguez, A. Misi (Eds.). O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/SGM/CNPq, pg. 161-185.
- Galloway, W.E., 1989, Genetic stratigraphic sequences in basin analysis. I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 73, 125–142.
- Gray, K. 1989. Handbook for study of stromatolite and associated structures (second draft): In Kennard J.M. and Burne R. V.(eds. stromatolite Newsletter, 14: 82-140).
- Halverson G.P., Dudás F.O., Maloof A.C., Bowring S.A. 2007. Evolution of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  composition of Neoproterozoic seawater, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 256: 103–129.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. & Schrag, D.P., 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. Science 281, 1342-46.
- Hunt, D & Tucker, M. E. Stranded parasequence and the forced regressive wedge systems tract: depositional during base level fall. Sedimentary Geology, Vol 88, p 1-9. 1992.

- Jacobsen S. & Kaufman A. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of the Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161:37-57.
- Kawashita, K, Mizusaki, A.M.P., Chang, H.K. 1987. Razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  em sedimentos carbonáticos do Grupo Bambuí (MG). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 1, Porto Alegre. Anais...,v.1, p. 133-137.
- Kaufman A.J. & Knoll A.H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73:27-49.
- Knoll A.H. & Walter M.R. 1992. Latest Proterozoic stratigraphy and Earth history. *Nature*, 356:673-678.
- Kuchenbecker, M. 2011. Químioestratigrafia e proveniência sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG). Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 91p.
- Jervey, M. T. Quantitative geological modeling of siliciclast rocks sequences and their seismic expression. Special publication, p 47-69. 1988.
- Jones C.E., Jenkyns H.C., Coe A.L., Hesselbo S.P. 1994. Strontium isotopic variations in Jurassic and Cretaceous seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58:3061–3074.
- Martin E.E., MacDougall J.D. 1991. Seawater Sr isotopes at the Cretaceous/Tertiary Boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 104:166–180.
- Martins M. 1999. Análise estratigráfica das sequências Mesoproterozóico (borda oeste) e Neoproterozóicos da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 214 p.
- Martins M., Lemos V.B. 2007. Análise estratigráfica das sequências Neoproterozóicos da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4-Suplemento): 156-167.
- MARTINS-NETO, M. A.. Sequence Stratigraphy framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 26, p. 163-176, 2009.
- MARTINS-NETO, M. A. . Proterozoic first-order sedimentary successions of the São Francisco basin in eastern Brazil. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, v. 158, p. 117-129, 2007.



- Martins-Neto, M.A., 2005. A Bacia do São Francisco: Arcabouço estratigráfico e estrutural com base na interpretação de dados de superfície e subsuperfície. In: SBG, III Simpósio Cráton São Francisco, Salvador, Anais, pp. 283–286.
- MARTÍNEZ, M. I. 2007. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. IGC/UFMG. Belo Horizonte/MG. 122 p.
- MASCARENHAS, J.F.; PEDREIRA, A.J.; GIL, C.A.; NEVES, J.P.; OLIVEIRA, J.E.; SILVA FILHO, M.A.; MARINHO, M.M. Geologia da Região Centro-Oriental da Bahia - Projeto Bahia - Bahia II - Sul da Bahia; Relatório Integrado. Brasília, MME/DNPM, (Geologia Básica n.8). 128p. 1979.
- Melezhik V.A., Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Fallick A.E. 2001. Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonates: implications for 'blind dating'. *Terra Nova*, 13:1-11.
- Misi A. 2001. Estratigrafia isotópica das seqüências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Idade e correlações. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. SBG, Núcleo de Minas Gerais, p. 67-92.
- Misi A. & Veizer J. 1998. Neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brazil: Chemostratigraphy, age and correlations. *Precambrian Res.*, 89:87-100.
- Nobre-Lopes, J. 2002. Diagenesis of the dolomites hosting Zn/Ag mineral deposits in the Bambuí Group at Januária region-MG. Tese de doutorado. Unicamp, Campinas, 183 p.
- Nobre-Lopes J. 1995. Faciologia e gênese aos carbonatos do grupo Bambuí na região de Arcos, Estado de Minas Gerais. São Paulo, 166p. (Dissertação de Mestrado-Instituto de Geociências/Universidade de São Paulo).
- Oliveira, M.A.M. 1967. Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. *Petrobrás, Série Ciência Técnica-Petróleo, Public. 3: 71-105.*
- Pimentel, M.M., Rodrigues, J.B., DellaGiustina, M.E.S., Junges, S., Matteini, M., Armstrong, R. 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South America Earth Sciences*, 31:345-357.

- Pimentel, M.M.; FUCK,R.A. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, v. 20, n. 4, p. 375-379, 1992.
- Pimentel, M.M.; HEAMAN,L.; FUCK,R.A; MARINI,O.J. U-Pb zircon geochronology of Precambrian tin-bearing continental-type acid magmatism in central Brazil. *Precambrian Research*, v. 52, p. 321-335, 1991.
- Posamentier H. W., Vail P. R. Eustatic controls on clastic deposition II-sequences and systems tract models. *Special publication SEPM* p 125-154.1988.
- RADAMBRASIL. 1982. DNPM. Folha SD.23, Brasília. Rio de Janeiro, 660 p.
- Raja Gabaglia G.P., Magalhães A.J.C., Arregui, C.D., Savini R. Criteria to recognize sequence orders and tectonic imprint in cyclic siliciclastic IAS, Japon. 2007.
- Rimann, E. 1917. Kimberlita do Brasil. *Ouro Preto. Na. Esc. Minas*, 15: 27-32.
- Rodrigues, J.B. 2008. Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí: um estudo de zircões detríticos e idades modelos Sm-Nd. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 141p.
- SANTANA, R. O. 2009. Estratigrafia de sequências da base da formação Tombador, nos arredores de Lençóis. Chapada Diamantina-Ba. Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal da Bahia – UFBA. 126p.
- Schidlowski M., Hayes J.M., Kaplan I.R. 1983. Isotopic inference of ancient biochemistries: carbon, sulfur, hydrogen and nitrogen. In: Schopf, J.M. (ed.), *Earth's Earliest Biosphere, its origin and Evolution*. Princeton University Press, p. 149-186.
- Severiano Ribeiro, H.J.P. (org.). *Estratigrafia de Sequências: fundamentos e aplicações*. São Leopoldo, RS. 428p., 2001.
- Sloss LL. 1963. Sequences in the cratonic interior of North America. *Geol. Soc. Am. Bull* 74:93-114.
- Soares J.E.P., Fuck R.A., Berrocal J. 2005. Geophysical signature of the lithosphere at the western border of São Francisco plate. In: SBG, *Simpósio sobre o Cráton do São Francisco*, 3, Salvador, Anais, 1:48-51.
- Tonietto, S. N. 2010. Diagenese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozóicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UnB. 168p.

- Thunell R.C., Williams D.F., Howell M. 1987. Atlantic-Mediterranean water Exchange during the Late Neogene. *Paleoceanography*, 2:661-678.
- Tucker, M.E. & Wright, V.P. 1990. *Carbonate Sedimentology*. 1. ed. Oxford, Blackwell. 482p.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M. Jr., Thompson, S. Siesmic stratigraphy and global changes of sea level. *AAPG Memoir* 26, p. 83-98. 1977.
- Van Wagoner JC, Mitchum RM, Campion KM, Rahmania VD .1990. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts of High-Resolution Correlation of time and Facies. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Methodisn Exploration Series*, No. 55 pp.
- Valeriano, C.M. 1992. Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da represa de Furnas, sudoeste de Minas Gerais. Tese Doutorado. São Paulo, Inst. Geoc, USP, 198p.
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Bruckschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebneith 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.; ALMEIDA, R. P.; TRINDADE, R.I.F. ; NOGUEIRA, A. C. R. ; JENIKIAN, L. . A Formação Sete Lagoas em sua área-tipo: fácies, estratigrafia e sistemas deposicionais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, p. 1-14, 2007
- Zalán P. V. & Romeiro-Silva P.C. 2007. Proposta de mudança significativa na coluna estratigráfica da Bacia do São Francisco. In: 14<sup>o</sup>. Simpósio de Geologia de Minas Gerais e 10<sup>o</sup> Simpósio de Geologia do Sudeste, Anais, p. 79.