



Universidade Federal de Pernambuco
Programa de Pós -Graduação em Geociências

**Quimioestratigrafia e Bioestratigrafia da Formação Frecheirinha,
Grupo Ubajara - Nordeste do Brasil**

Aluno: Leticia Lourdes Chiglino Mendizábal

Orientador: Prof. Alcides Nóbrega Sial

Recife/2013

LETICIA LOURDES CHIGLINO MENDIZABAL

Geóloga, Universidad de la República, Uruguai, 2006

Quimioestratigrafia e Bioestratigrafia da Formação Frecheirinha,
Grupo Ubajara - Nordeste do Brasil

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, em 29 de outubro de 2013 em preenchimento parcial á obtenção do grau de Doutor em Geociências, área de concentração Geoquímica, Geofísica e Evolução Crustal.

Recife/2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M538q Mendizábal Leticia Lourdes Chiglino.
Químioestratigrafia e Bioestratigrafia da Formação Frecheirinha, Grupo Ubajara – Nordeste do Brasil / Leticia Chiglino Mendizábal. – Recife: O Autor, 2013.
101f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alcides Nóbrega Sial.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2013.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Geociências. 2. Ediacarano. 3. C-isótopo. 4. Acrítarcas. 5. Neoproterozoico I. Sial, Alcides Nóbrega (Orientador). II. Título.

551 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2013 / 320

QUIMIOESTRATIGRAFIA E BIOESTRATIGRAFIA DA FORMAÇÃO FRECHEIRINHA, GRUPO UBAJARA-NORDESTE DO BRASIL

Leticia Chiglino Mendizabal

APROVADA, em 29 de Outubro de 2013

Alcides Nóbrega Sial

Claudio Gaucher

Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann

Manoj Kumar Pendit

José Antônio Barbosa

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meu especial agradecimento para:

A CAPES pela bolsa concedida durante este tempo que permito me dedicar a esta pesquisa.

A UFPE, Programa de Pós-Graduação em Geociências que abriu as portas para poder realizar este trabalho.

Ao Prof. Alcides Nóbrega Sial pela oportunidade de desenvolver este trabalho, amizade, confiança e paciência durante todo este tempo.

Ao Prof. Claudio Gaucher pelo incentivo e amizade desde o início da minha aventura na geologia e os conselhos para que este trabalho saísse bem.

A Profa. Valdevez Pinto Ferreira por o apoio desde que chegue e pela preocupação e cuidado nas análises.

Ao Prof. Jorge Bossi, por sua participação nos trabalhos de campo e discussão

Ao todo o equipe do Neg-Labise, a Vilma Sobral Bezerra e Gilsa M. de Santana pelo cuidado na realização de das análises.

A os professores coordenadores da Pós Graduação, Profa. Inéz Guimarães e Prof. Mariano Gorki pelo apoio.

A todas as pessoas que teve a oportunidade de conhecer em este tempo, que sempre acreditarem em mim e fizeram sentir de Recife minha casa.

MUITO OBRIGADO.

RESUMO

O Grupo Ubajara localiza-se no Domínio Médio Coreaú, nordeste da Província Borborema, constitui uma sequência de plataforma marinha rasa, conformada a base ao topo por arenitos da Formação Trapiá, pelitos da Formação Caiçaras, calcários e margas subordinadas da Formação Frecheirinha, e no topo arenitos e guarvacas da Formação Coreaú. Os carbonatos da Formação Frecheirinha apresenta valores negativos de ($\delta^{13}\text{C}$ -3.5 ‰ e +3.7 ‰) em direção ao topo, e razão de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0.7075 e 0.7080. Pela primeira vez, são descritos para uma sequência do nordeste do Brasil, microfossies de parede orgânica que se caracterizam pela baixa diversidade, compreendendo espécimens de *Leiosphaeridia* e *Bavlinella* subordinada. Esses dados, combinados com restrições de idade mínima de 560 ± 19 Ma determinada para diques máficos que cortam a unidade, sugerem uma idade de deposição Ediacarana entre 635 e ca. 580 Ma, para a Formação Frecheirinha. A diferença de outras unidades carbonáticas Ediacaranas no Brasil, a Formação Frecheirinha não tem depósitos glaciais associados, ou características sedimentares típicas das capas carbonáticas pós-glaciais. Os valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ refletem a bioproductividade e as alterações do nível do mar no momento de deposição. Os carbonatos da Formação Frecheirinha são importantes para a compreensão da biota e as concomitantes mudanças na composição isotópica da água do mar, como também na reconstrução paleogeográfica entre os episódios de quebra do supercontinente Rodinia e a fusão do Gondwana.

Palavras chaves: Ediacaran, C-isótopo, Acrítarcas, Neoproterozoico

ABSTRACT

The Ubajara Group, located in the Domínio Médio Coreaú, in the northeast of Borborema Province, is a platform marine sequence, constituted the base for the top for, quartzites Trapiá Formation, slates of the Caiçaras Formation, the limestones and subordinate marls of the Frecheirinha and the sandstones of the Coreaú Formation. The carbonates of the Frecheirinha Formation, showing negative values of $\delta^{13}\text{C}$ between -3.5 ‰ and +3.7 ‰ and values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ between 0.7075-0.7080. Reported for the first time for the northeastern Brazil, organic well microfossils, characterized by low diversity, including specimens of *Leiosphaeridia* and *Bavlinella* subordinate. These data, combined with the minimum age of 560 ± 19 Ma, determined for mafic dikes that cut the unit, suggest an Ediacaran depositional age between 635 and ca. 580 Ma, for Frecheirinha Formation. Unlike other Ediacaran carbonate units in Brazil, has no associated glacial deposits or sedimentary features, typical of post-glacial cap carbonates. The negative values of $\delta^{13}\text{C}$ reflect the bioproductivity and sea level change at the time of deposition. The carbonates of Frecheirinha Formation are important to understanding the biota and concomitant changes in the isotopic composition of sea water, but also in the reconstruction paleogeographical between the break-up of supercontinent Rodinia and fusion Gondwana.

Keys Words : Ediacaran, C-isotope, acritarchs, Neoproterozoic

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO.....	2
1.1 Eventos Glaciais Neoproterozóicos.....	5
<u>1.1.1 “Snowball Earth”</u>	6
<u>1.2 A Vida durante o Neoproterozóico</u>	11
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1 <u>Geral</u>	13
1.3.2 <u>Específicos</u>	13
1.4 Localização da área de estudo.....	14
1.5 Organização da Tese.....	15
 CAPÍTULO II. MATERIAS E MÉTODOS.....	16
2.1. Análise bibliográfica.....	17
2. 2. Trabalho de Campo.....	16
2.3. Trabalho de Laboratório.....	16
<u>2.3.1 Análises Petrográficas</u>	17
<u>2.3.2. Análises de isótopos e química mineral</u>	18
<u>2.3.4. Estudos Palinológicos</u>	19
 CAPÍTULO III.....	20
 ARTIGO 1: C-isotope chemostratigraphy of the Ediacaran Frecheirinha Formation, Ubajara Group Northeastern, Brazil. Chiglino, L., Sial, N.A., Gaucher, C., Ferreira, P.V., Pimentel, M.	

CAPÍTULO IV.....	45
------------------	----

ARTIGO 2: Acritarchs of the Ediacaran Frecheirinha Formation, Ubajara Group, Northeastern Brazil. Chiglino, L., Gaucher, C., Ferreira, P.V.

CAPÍTULO V.	71
------------------	----

ARTIGO 3: Carbonatos Ediacaranos da Formação Frecheirinha (Grupo Ubajara), Domínio Médio Coreaú - Província Borborema : implicações paleogeográficas e paleoclimáticas. Chiglino, L., Gaucher, C., Ferreira, P.V.

CAPÍTULO VI.	88
-------------------	----

CONCLUSÕES.....	89
-----------------	----

CAPÍTULO VII.	91
--------------------	----

Referências	92
-------------------	----

APÊNDICE.	96
----------------	----

CAPITULO I

<i>Figura 1. Mapa geológico simplificado da Província Borborema e geología do Domínio Médio Coreaú (Modificado de Santos, et al., 2008).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Curva global de $\delta^{13}C$ (Halverson, 2011).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. Bioestratigrafia do Neoproterozoico</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4. Mapa de localização da área de estudo.....</i>	<i>14</i>

CAPITULO I

I. INTRODUÇÃO

A Província Borborena, nordeste do Brasil, ocupa aproximadamente 450.000 km², limita da ao norte com o Cratón de São Luis, ao noroeste com a Bacia do Parnaíba, e ao sul com o Cratón de São Francisco. Caracteriza-se por ser um mosaico formado por complexos migmatíticos paleoproterozóicos, supracrustais de idades Meso-Neoproterozóicos e corpos granitóides brasileiros, separados por sistemas de falhas e lineamentos de escala continental (Almeida, et al., 1981). A evolução da Província Borborema inicia-se no Arqueano e finaliza no final do Neoproterozóico, com orogenia Brasileira/Pan-Africana (660 e 570 Ma), responsável pela fusão do Gondwana Ocidental. Quatro principais domínios geológicos-tectônicos são identificados na província, com base na evolução tectônica e composição. Brito Neves et al.(2000) dividem a Província Borborema em quatro domínio: (a) Domínio Médio Coreau, entre o Lineamento Transbrasiliano (NE) e o Cráton de São Luis-África (NW); (b) Domínio Setentrional posicionado entre os Lineamento Transbrasiliano (NE-SW) e Patos (WE); (c) O Domínio Transversal situado entre os lineamentos Patos e Pernambuco (lineamentos E-W) na parte central da província; (d) Domínio do Sul, ao sul do Lineamento Pernambuco.

Os carbonatos da Formação Frecheirinha, objeto de nosso estudo, estão inseridas no Domínio Médio Coreau. O arcabouço geológico do domínio é representado pelos, ortognaisses e migmatitos Paleoproterozóicos do Maciço de Granja (2.357-2.271 Ma; Brito Neves, 1983), a sequência vulcano-sedimentar Saquinho, de idade Paleoproterozóica Tardia, e as sequências vulcano-sedimentar Neoproterozóicas-Cambrianas dos Grupos Martinopoles e Jaibaras (566-532 Ma), e atividade magmática representada pelos granito brasileiros. (Fig.1)

O Grupo Ubajara (Costa et al., 1979) representa uma sequência de plataforma proximal, formada da base ao topo por: (a) Formação Trapiá, conglomerados e arenitos; (b) Formação Ciaçaras, arenitos finos e siltitos vermelhos; (c) Formação Frecheirinha, carbonatos e margas subordinadas e (d) Formação Coreaú, arenitos e guarvacas. A área tipo localiza-se entre a cidade de Aprazível e Saco, ao longo da BR 222. A idade Neoproterozoica do grupo, até agora tem sido inferida por: (a) idade U-Pb de 540 Ma determinada para o granito Mucambo que intrude o grupo e (b) a idade Rb-Sr de 560 Ma nos Diques de Coreaú que cortam a unidade, e determinam a idade de máxima de deposição. O assunto da idade tem sido muito discutido na literatura. Trabalhos como o de Costa et al. (1979) e Hackspacher et al. (1987), sugerem a correlação do Grupo Ubajara com o Grupo Bambuí (ca. 610 Ma, Lima, B. 2012). Sial et al. (2000) reporta, as primeiras as curvas de $\delta^{13}\text{C}$ para a Formação Frecheirinha, propondo 980 Ma, como idade de deposição e correlação com Grupo Paranoá de idade Mesoproterozoica. A falta de rochas vulcânicas no Grupo Ubajara, que permitam datar com precisão, as relações de contato sempre tectônico com as outras unidades da região, e parte dos afloramentos deste cobertos pelos depósitos da Bacia do Parnaíba, fazem com a que reconstrução estratigráfica e a história tectônica do Domínio Meio Coreaú seja difícil de entender.

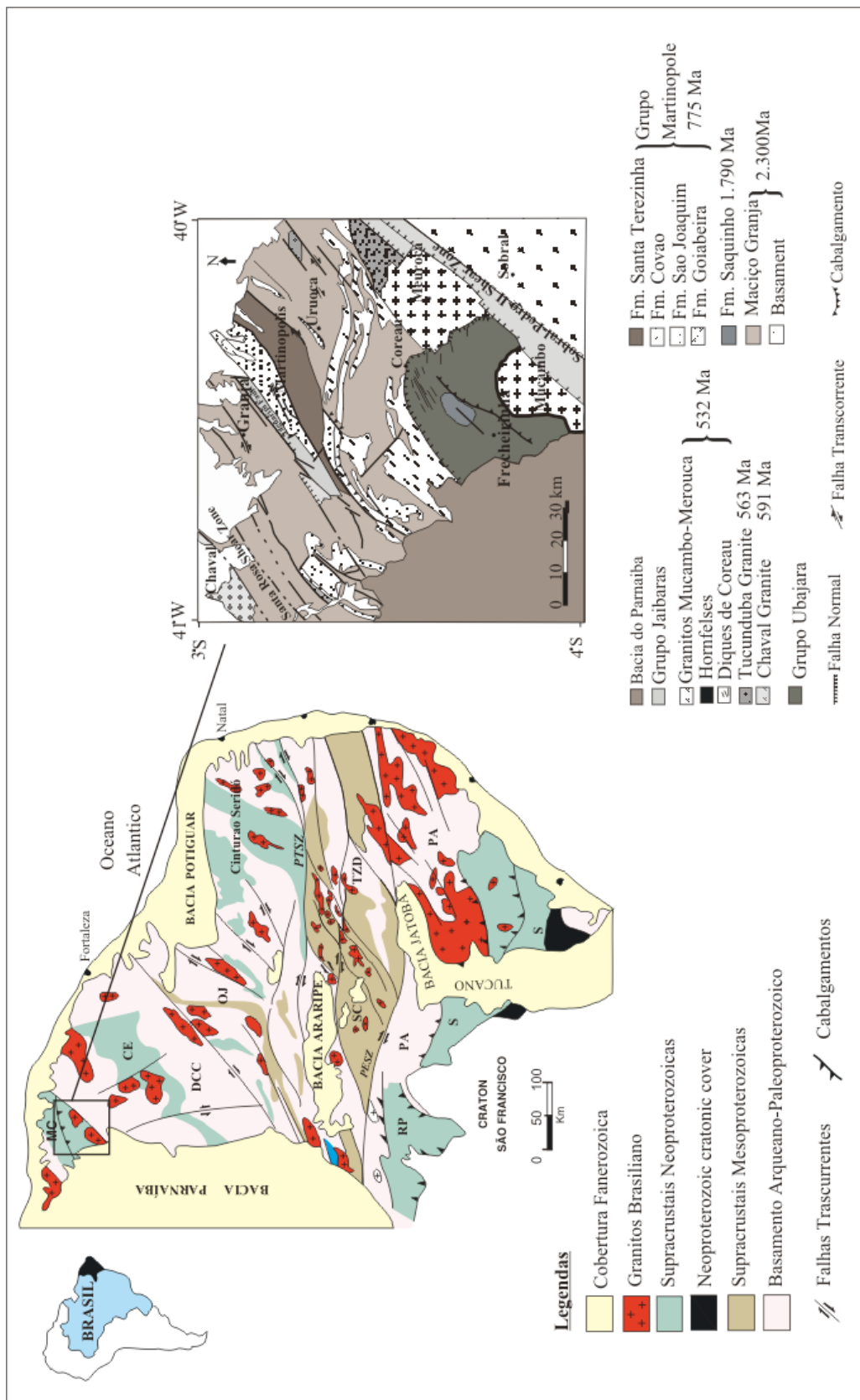


Figura 1. Esquema geológico da Província Borborema e Domínio Médio Coreau(Modificado de Santos et al., 2000)

O interesse em estudar a Formação Frecheirinha se deve ao fato que durante o Neoproterozoico (1000-540 Ma) a Terra sofreu importantes mudanças climáticas, biológicas e geoquímicas. Hoffman and Schrag (2000), em função de estudos quimioestratigráficos e sedimentológicos, de diferentes unidades carbonáticas Neoproterozoicas, depositadas acima de depósitos glaciais, propuseram a hipótese de “*Snowball Earth*”. Esta hipótese propõe que durante este período ocorreram pelos menos dois eventos glaciais no Criogeniano Inferior (710Ma) e Superior (635Ma), na qual a Terra foi completamente coberta por gelo. Portanto, as sequências carbonáticas tornam-se importantes para a reconstrução paleoclimática, paleogeográfica e entendimento da evolução dos oceanos durante o Neoproterozoico.

1.1 Eventos glaciais Neoproterozoicos

Durante o Criogeniano (1000-635Ma), os continentes foram reunidos em um supercontinente conhecido como Rodínia, que persistiu até 900 Ma, para depois, em torno de 725 Ma já localizado perto do equador, começar a quebrar-se. A quebra do Rodínia levou ao desvio de grandes massas de terra para o hemisfério sul, no final do Criogeniano (635Ma) até o Ediacarano (635-540Ma). Ao final do Ediacarano (540Ma) começou um novo processo de fusão dos continentes. Em torno de 530 Ma, a maioria da área continental constitui um novo supercontinente conhecido como Gondwana, que se estendeu desde o Pólo Sul a os trópicos e que perdurou até o Fanerozoico.

O cenário tectônico que acontece durante o Neoproterozoico foi acompanhado por drásticas mudanças climáticas representadas por três eventos glaciais. As glaciações são conhecidas na literatura, como : Criogeniana Inferior ou Sturtiana (740Ma, Brasier et al., 2000), Criogeniana Superior ou Marinoana (635 Ma, Hoffmann et al., 2004) e Gaskeriana no final do Ediacarano (580 Ma, Bowring et al., 2003). As duas glaciações registradas durante o Criogeniano são de alcance global e se definem dentro da teoria de “Snowball Earth”. Quanto a glaciação Gaskeriana ainda se discute se corresponde a um evento global ou se é semelhante as que ocorreram durante o Fanerozóico.

1.1.1 “Snowball Earth”

A hipótese de “Snowball Earth” (Hofmann et al,1998; Kirschvink, 2002; Hoffman & Schrag (2002) consiste, basicamente, na idéia de que a superfície da Terra foi inteiramente congelada, o que explicaria, a grande quantidade de registros de sedimentos glaciais depositados a baixas latitudes, ao redor do mundo. Hoffman & Schrag (2002) apresentaram, algumas das condições tectônicas, geoquímicas e físicas que favoreciam o desenvolvimento deste fenômeno. Consideraram que o processo de fragmentação do Rodínia que determinou a distribuição de grandes massas de terra entre médias e baixas latitudes, gerou novas condições climáticas, mais úmidas e quentes, que provocaram o aumento da taxa de meteorização dos silicatos nos continentes. Este aumento teve como consequência a redução dos chamados gases de efeito estufa na atmosfera, principalmente de CO₂ e CH₄. Esse aumento, produziu a queda das temperaturas, fazendo com que o frio se instalasse como temperatura global com grandes áreas cobertas de gelo e neve. O gelo e a neve refletem mais radiação solar do que a terra ou água líquida, provocando um “*feedback* positivo”. Isso significa que, se a Terra encontrava-se com uma metade coberta por gelo ou neve, o *feedback* se tornaria auto-sustentável e o gelo glacial se espalha rapidamente para o equador.

Mesmo assim, com a Terra coberta por grossas camadas de gelo, a atividade tectônica continuou, manifestando-se através de vulcões submarinos e aberturas, que aportavam quantidades de CO₂ para água do mar e atmosfera através dos vulcões terrestres subglaciais.

A taxa de meteorização dos silicatos, com a superfície coberta por gelo é nula, e o CO₂ começa a se acumular na atmosfera, aumentando a concentração de gases de efeito estufa, e gerando o aumento da temperatura. Conforme o planeta aquecia, a umidade sublimada dos mares gelados próximos ao equador, seria refrigerada nas elevações mais altas e alimentaria o crescimento de geleiras continentais. A água exposta, que se formara nos trópicos, absorvera mais energia solar e iniciara uma rápida elevação da temperatura global. As temperaturas superficiais se elevaram cerca de 50°C, gerando condições climáticas tropicais, com intensos ciclos de evaporação e precipitação.

Estudos sedimentológicos, estratigráficos, paleomagnéticos e geoquímicos, que se vem realizando até agora, nos diferentes perfis associados os eventos glaciais Neoproterozoicos, revelam um conjunto de características bem particulares que os permitem identificar. O mais importante, é a que leva ao desenvolvimento da hipótese de *Snowball Earth* é a presença de sequências carbonáticas ssobrepostas e em contacto abrupto com os depósitos glaciais, são os denominados “*cap carbonates*” (Hoffman et al., 1998; Kennedy et al., 2001). As capas carbonáticas representam uma sequência transgressiva que revela a passagem abrupta de condições glaciais para tropicais e o subsequente aumento do nível do mar. Apresentam um arranjo característico da base ao topo composto por dolomitas na base com estruturas sedimentares do tipo *ripples* gigantes e peloides, que indica deposição rápida; e calcáreos em direção ao topo. Os calcáreos apresentam cimento composto por cristais gigantes de aragonita, estruturas de escape de gás metano e níveis estromatolíticos.

A necessidade de análises quimioestratigráficas como ferramenta complementar no estudo de sequências carbonáticas Neoproterozoicas, devido falta de dados bioestratigráficos e ausência de rochas que permitam datações radiométricas, tem sido fundamental para determinar idade e condições de deposição. Kaufman e Knoll, 1995; Veizer et al., 1999; Jacobsen e Kaufman, 1999; Knoll 2000; Sial et al., 2000; Melezhik et al., 2001; Halverson et al., 2011). O uso de isótopos de carbono tem sido muito importante para caracterizar as capas carbonáticas, porque estes se depositam em equilíbrio isotópico com a água do mar, e qualquer desvio do equilíbrio ou a separação do carbono em reservatórios distintos, se reflete no valor de $\delta^{13}\text{C}$. O carbono tem dois isótopos estáveis, ^{12}C e ^{13}C , dos quais o ^{12}C é o dominante no sistema Terra. A variação de $\delta^{13}\text{C}$, se calcula como na equação 1 e se expressa em partes por mil (‰), usando como padrão o Pee Dee Belemnite (PDB), da Formação Pee Dee na Carolina do Sul nos EUA, e posteriormente o V-PDB que corresponde a um padrão preparado em Viena, Austria, após o PDB original ter-se exaurido. Partindo desses princípios, o estudo isotópico permite, reconstruir as variações no ciclo do carbono, através de *trends* de variação secular $\delta^{13}\text{C}$ (Hoffman et al., 1998; Kaufman e Knoll, 1995; Kha, et al. 1999). As curvas apresentadas, para diferentes capas carbonáticas, relacionadas com eventos glaciais Neoproterozóicos caracterizam-se por fortes oscilações entre valores positivos e negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (Fig. 2). De forma geral, observa-se que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ negativos surgem antes das glaciações e se recuperam gradualmente para valores positivos após o degelo (Halverson, et al. 2011), os valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, estariam relacionados com a diminuição da produtividade biológica, como consequência das glaciações. Grossas camadas de gelo, sobre o oceano gera condições extremamente restritivas para actividade biológica e também favorece o desenvolvimento de oceanos estratificados, devido a diminuição das correntes oceânicas.

Equação 1. $\delta^{13}\text{C} = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ amostra} - 1 \times 10^3$

$^{13}\text{C} / ^{12}\text{C} \text{ amostra}$

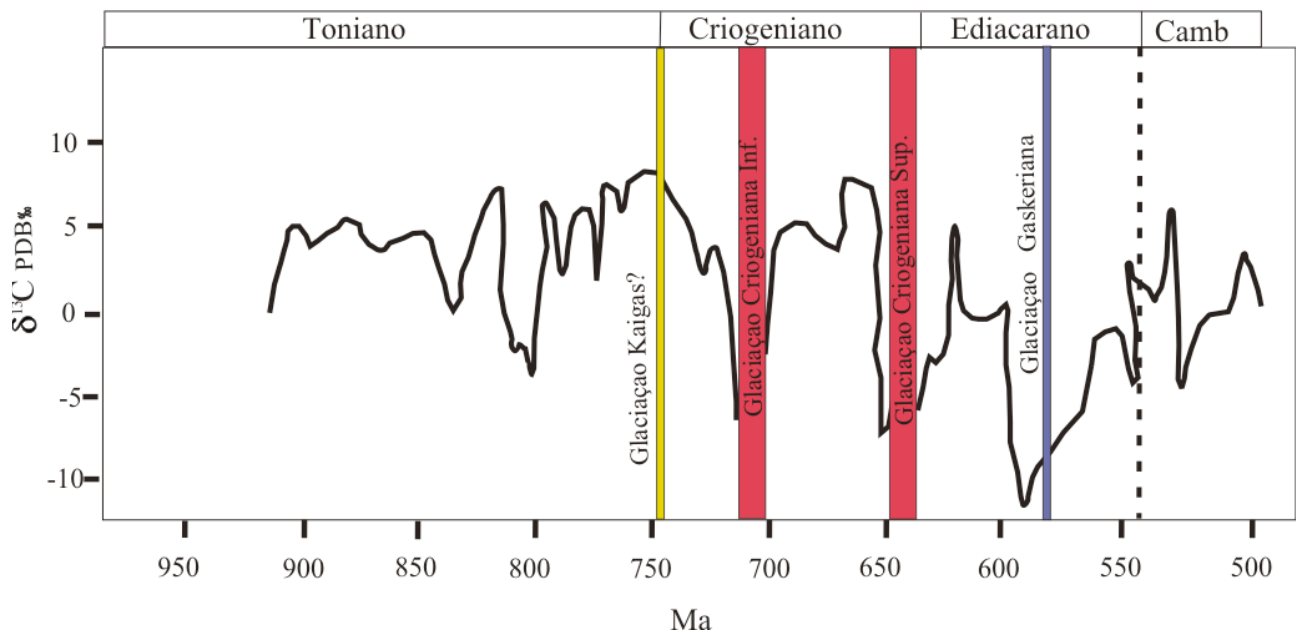


Figura 2. Curva global de $\delta^{13}\text{C}$, modificada de Halverson (2010).

Com o fim da glaciações, e a retomada das correntes de circulação dos oceanos, os processos de ressurgimento, transportam para a superfície as águas anóxicas, com alto teor de alcalinidade, liberando CO₂ e depositando as capas carbonáticas com valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$.

A presença de depósitos de ferro, conhecidos como BIF (*banded iron formation*), sobrepostos a depósitos glaciais presentes no Grupo Rapitan no Canadá, as formações Chuos e Numees na Namíbia, o Grupo Jacadigo a Formação Puga no Cinturão Paraguai no Brasil, também ajudam a entender a química dos oceanos durante o Neoproterozoico. Caracterizam-se por extensos depósitos sedimentares de Fe (III) e chert, cuja origem não está diretamente associada com vulcões ou atividade hidrotermal. Os BIFs associados a depósitos glaciais se geram devido a períodos de concentração do elemento ferro livre, sem oxidação em águas profundas dos oceanos, que teriam ficado pobres em oxigênio devido ao isolamento pelas camadas de gelo. Com o derretimento das coberturas de gelo e o enriquecimento das águas com oxigênio, teria ocorrido a deposição das formações ferríferas. Para Canfield (2008) os oceanos profundos durante o Neoproterozoico seriam ricos em Fe, o que explicaria a presença de depósitos de ferro não relacionados a eventos glaciais, como acontece com o Grupo Arroyo del Solado, Uruguai, e propõe que o processo seria mais complexo de que a passagem de oceanos sulfurosos para oxigenados como ocorreu do Arqueano para o Proterozoico.

1.2 A vida durante o Neoproterozoico.

Durante o Neoproterozoico, teve lugar uns dos momentos mais importante na evolução da vida na Terra, a diversificação de organismos unicelulares ou eucariotas, com o surgimento dos metazoários. Os acritarcas, estão entre os eucariotas mais antigos no registro fóssil (2500-542Ma), que compõem o fitoplâncton marinho (Fig.3 e 4). No registro geológico se observa o aumento da presença dos acritarcas, durante o Meso e Neoproterozóico inferior, para depois sofren uma queda durante eventos glaciais Criongenianos, e um rápido aumento no Ediacarano (Moczydlowska, 2008) (Fig.3).

A diversificação e extinção dos organismos, está associada a períodos nos quais a Terra passou por mudanças drásticas, como a quebra e formação de supercontinentes, glaciações globais e alterações na química dos oceanos.

Segundo a hipótesis de “*Snowball Earth*”, o único refúgio para as bactérias e eucariotas simples, seriam os lagos de água derretida, rachaduras de gelo ou veios hidrotermais, condições extremas de sobrevivência, que funcionariam como ciclos genéticos seletivos (Hoffman, et al., 1998; Hoffman & Schrag, 2002). Nesse ponto, existem divergências na comunidade científica, para autores como Runnegar, 2000, e Moczydlowska, 2008, que através de modelos físicos e dados paleobiológicos, determinaram que seria impossível a sobrevivência de qualquer organismo em uma Terra coberta por grossas camadas de gelo por milhões de anos. Propuseram, que o modelo mais apropriado seria o que denominaram de “*Slushball Earth*”. Nesse modelo, a Terra não teria estado completamente coberta por gelo havia mar aberto ou finas camadas de gelo em oceanos equatoriais o que permitiria a continuidade do ciclo hidrológico que supriria de nutrientes e canais de dispersão através das correntes oceânicas, para os organismo.

Gaucher e Sprechman (2009) apresentam a diversificação dos acritarcas, durante

o Neoproterozico em sete fases: (1) diversificação durante o Toniano e Criogeniano inferior; (2) crise durante Criogeniano médio; (3) recuperação durante o Criogeniano médio; (4) crise durante o Criogeniano superior; (5) recuperação no Ediacarano inferior; (6) a explosão durante o Ediacarano médio; (7) crise no Ediacarano final. Cada uma dessas fases tem uma assembleia de organismos guia, que permite identificar as, como se apresenta na figura 3.

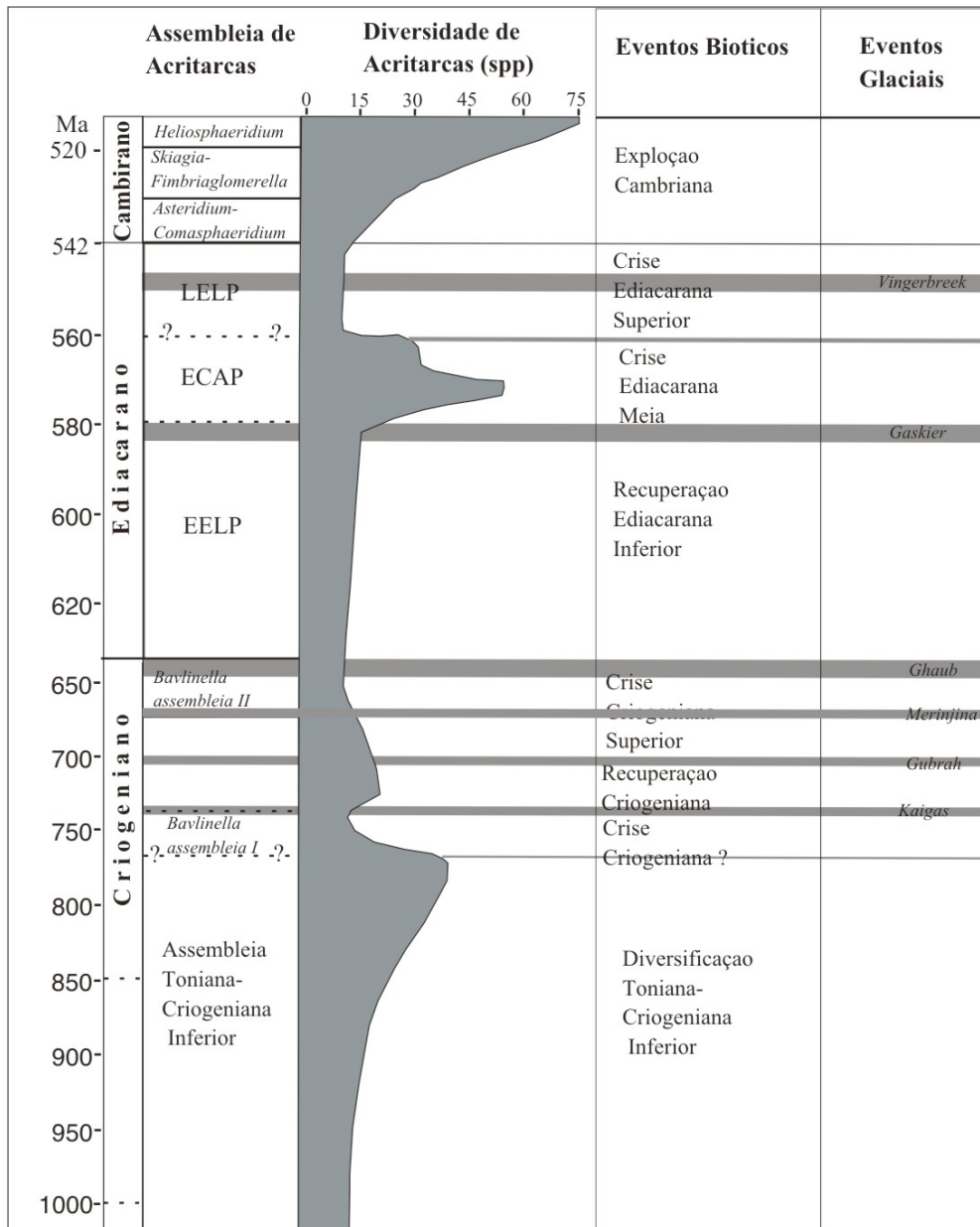


Figura 3. Bioestratigrafia do Neoproterozoico (modificada de Gaucher e Sprechman, 2009). EELP: Early Ediacaran Leiosphaeridia Palynoflora; ECAP: Ediacaran Complex Acantamorph Palynoflora; LELP: Late Ediacaran Leiosphaeridia Palynoflora

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

Caracterizar desde o ponto de vista geoquímico, quimioestratigráfico (C e O) e bioestratigráfico, os carbonatos da Formação Frecheirinha, como ferramenta para determinar a idade, ambiente e contexto paleogeográfico durante a deposição dos mesmos.

1.3.2. Específicos

- 1) Elaborar as colunas estratigráficas correspondentes às diferentes unidades em estudo e coleta de amostras.
- 2) Estudos geoquímicos dos carbonatos: elementos maiores, traços e terras raras.
- 3) Determinar os valores de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ e $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ e elaborar as curvas.
- 4) Coleta das amostras para realizar os estudos palinológicos.

1.4 Localização da área de estudo

A área de trabalho localiza-se, no entrono das cidades de Frecheirinha e Ubajara a 300 km da cidade de Fortaleza. As principais vias de acesso ao local são as Rodovias BR 222 e BR 71 (Fig. 4).



Figura 4. Mapa de localização da área de estudo.

1.5 Organização da Teses

Esta teses e apresentada na forma de três artigos, os quais são organizados da seguinte forma: o premer artigo apresenta, os resultados do estudos quimioestratigráficos, com dados de isótopos de carbono e oxigênio. O segundo artigo, apresenta estudos palinologicos da Formação Frecheirinha, enviado para Anais da Academia Brasileira de Ciências. O último capítulo, foi escrito em forma de artigo, e apresenta a relação entre a Formação Frecheirinha e outras unidades carbonáticas Neoproterozóicas, e su contexto paleogeográfico durante o Edicarano.

CAPITULO II

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar este trabalho de pesquisa foram cumpridas as seguintes etapas:

2.1. Análise bibliográfica

_____ Compilação e estudo de antecedentes geológicos locais e regionais relacionados a área de trabalho, como também a leitura de material científico específico (livros, artigos) sobre o tema abordado nesta pesquisa.

2.2. Trabalho de Campo

2.2.2. Elaboração dos perfis estratigráficos.

_____ Nesta etapa, reconheceu-se os tipos litológicos no campo, relações espaciais e genéticas, características estruturais, entre diferentes unidades em estudo.

Foram selecionados sete pontos de interesse para a construção de colunas estratigráficas e posterior coleta de amostras de calcários, para análises petrográficas e isotópicas.

2.3. Trabalho de Laboratório

2.3.1. Análises Petrográficas

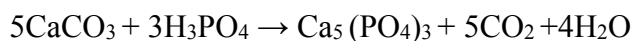
Elaboração de lâminas delgadas, utilizando o método de laminação e polimento standard, de Tucker (1989) e descrição petrográfica.

A partir deste estudo, realizou-se a seleção das amostras para análises químicas isotópicas, optando por aquelas que apresentavam menos evidências de alterações. As amostras selecionadas foram processadas nos laboratórios de laminação e microscopia óptica dos departamentos de Geologia da Faculdade de Ciências (Uruguai) e no NEG-LABISE da UFPE (Brasil).

2.3.2. Análises de isótopos e química mineral.

As amostras selecionadas foram pulverizadas, utilizando um moinho de disco orbital 365 Ma do Laboratório de Preparação de Amostras (LPA), do Departamento de Geologia da UFPE. Separou-se 20 mg de cada amostra, os que foram colocados cada uma em um tubo de reação para reagir com ácido ortofosfórico, a seguir colocados em uma linha de extração de carbonatos para a retirada do ar e implantação do vácuo.

Depois desta etapa, a amostra foi colocada em “banho-maria”, a uma temperatura de 25°C, dando início a seguinte reação:



Uma vez obtido o gás CO₂, o mesmo é analisado em um espectrômetro de massa SIRA II da V.G. ISOTECH, que permite a análise de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$. O padrão de correção utilizado é o BSC (Borborema Skarn Calcite), calibrado contra NBS-18 (carbonatito), NBS-19(toilet seat limestone) e NBS-20 (Solenhofen limestone).

A partir dos valores de $\delta^{13}\text{C}$, selecionou-se algumas amostras para análises químicas de elementos maiores e traças, no Laboratório de Fluorescência de Raios-X, equipado com a unidade Rigaku RIX 3000 XRF, com um tubo Rh. Com essas análises, determinou-se a relação entre as modificações presentes nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e as modificações na química mineral.

2.3.4. Estudos Palinológicos

As macerações palinológicas de carbonatos foram preparadas no Laboratório de Micropaleontologia da Facultad de Ciencias (Montevideu). Após trituração e digestão das amostras com ácido clorídrico concentrado, 72% de HF foi aplicado 24 horas. Finalmente, o resíduo foi tratado com HCl para dissolver o fluoreto de ebulição que se tenha formado no passo anterior. Adicionou-se água para neutralizar o sobrenadante, permitindo a resolução de pelo menos 30 minutos entre as lavagens. Os resíduos orgânicos foram recuperados por meio de uma peneira de 5 μm , armazenadas em frascos de vidro e montadas com gelatina-glicerina em lâminas de vidro standard. Os microfósseis foram determinados sob um micorscopio Leica DM LP de polarização, usando-se tanto luz transmitida como refletida.

CAPITULO III

C-isotope chemostratigraphy of the Ediacaran Frecheirinha Formation, Ubajara Group Northeastern, Brazil

Leticia Chiglino^{1*}, Alcides N. Sial¹, Claudio Gaucher², Valderez P. Ferreira¹, Marcio M. Pimentel³

¹NEG-LABISE, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

²Facultad de Ciencias, Universidad de La República, Montevideo, Uruguay

³Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

Abstract

The Middle Coreaú Domain, state of Ceará, is characterized by a series of NE-trending grabens and horsts. The Ubajara Group is overlain by the Jaibaras Group, which contains soft-bodied fossils assigned to the White Sea assemblage of the Ediacara fauna. The Ubajara Group is composed, from base to top, of the following formations: (a) Trapiá (quartz conglomerate), (b) Caiçara (ferruginous siltstones), (c) Frecheirinha (limestones and subordinate marls) and (d) Coreaú (sandstone and greywacke). The Frecheirinha formation is composed by limestones and subordinated marls at the base and culminating with thick stromatolitic limestones, represent a shallowing-upward sequence. The C-isotope curve obtained for the Frecheirinha Formation showing a negative values at the base of -3.5 ‰, passing up section into a positive excursion with maximum values of +3.7 ‰. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values range from 0.7075 to 0.7080. Preliminary palynological studies yielded a low-diversity microflora comprising *Leiosphaeridia* and subordinated *Bavlinella*. These data combined with minimum age constraints of 560 ± 19 Ma provided by crosscutting mafic dykes suggest an early Ediacaran depositional age between 635 and ca. 580 Ma.

The $\delta^{13}\text{C}$ negative values at the base of the carbonates may not be associated with a glacial event, but reflect sea-level and bioproductivity changes.

The Ubajara and Jaibaras groups are potentially important for our understanding of Ediacaran biogeochemical evolution. Soft-bodied Ediacaran macrofossils, acritarchs and thick carbonate deposits are important for the understanding of the biota and concomitant changes in seawater isotopic composition.

Keywords: Ediacaran, isotope stratigraphy, acritarchs, Ubajara Group, northeastern Brazil, Borborema Province

* Corresponding author; Phone/fax: 55-81-2126-8242, e-mail: leticia@ufpe.br

1. Introduction

The Neoproterozoic Era (1000-542 Ma) is characterized by significant changes in the biosphere, geochemistry and tectonics of the Earth (Gaucher et al., 2009; Halverson et al., 2010). Carbon and strontium isotope chemostratigraphy has been applied to different Precambrian successions to determine the depositional age and test the correlation between units. One of the most important features, observed in different sections of Neoproterozoic carbonates, are high-amplitude oscillations between positive and negative $\delta^{13}\text{C}$ values, associated to glacial events and drastic paleoceanographic changes (Kaufman and Knoll, 1995; Jacobsen and Kaufman, 1999; Melezhik et al., 2001; Hoffman and Schrag, 2002; Halverson et al., 2010). The number of glaciations that occurred during the Neoproterozoic is still matter of debate, but at least four are widely recognized (e.g. Hoffman and Li, 2009), namely: Kaigas (740 Ma), early Cryogenian (~ 720 Ma), end-Cryogenian (~ 635Ma) and Gaskiers (582 Ma), of which the last three are represented in South America (Gaucher et al., 2008; Sial et al., 2010; Alvarenga et al., 2011). The Ubajara Group is a Neoproterozoic siliciclastic-carbonate sequence, located in the Médio Coreaú Domain, Borborema Province (Costa et al., 1973; Santos et al., 2008), where the carbonates are clustered into the Frecheirinha Formation, consisting of limestones and subordinate marls. Sial et al., (2000), reported the first chemostratigraphic data, and correlated the $\delta^{13}\text{C}$ values (-8‰ to -1.2‰) of the lower Frecheirinha Formation with similar C isotopic values of the Paranoá Group (Sial et al., 2000). They proposed that these two units have been synchronously deposited.

In this paper we report new carbon-isotope and preliminary biostratigraphic data for the Frecheirinha Formation, and contribute to the discussion regarding its age and relationships with the Neoproterozoic glacial events.

2. Geology, stratigraphy and age

The Borborema Province located in northeastern Brazil, is the result of the convergence between the São Luis-East African Craton and the Congo-São Francisco Craton, during the formation of West Gondwana (Brito Neves et al., 2002; Almeida et al., 1981; Brito Neves and Cordani, 1991). It is composed of three tectonic domains separated by two regional shear zones, the Kandi-Transbrasiliano and the Patos-Garoua lineaments (Brito Neves et al., 2001).

The Ubajara Group is located in the Médio Coreaú Domain, characterized by graben and horst structures, which limits to the northeast with the Ceará Central Domain through the Transbrasiliano Lineament (Caby et al., 1991, Santos et al. 2008) and represents the southeastern extension of the Dahomeya–Pharusian Belts (Brito Neves et al., 2002). The geology of the Médio Coreaú Domain is characterized by a Paleoproterozoic basement comprising migmatites and gneisses of the Granja Complex (ca. 2.3 Ga: Brito Neves et al., 1983), the Saquinho volcanic sequence (ca. 1.79 Ga), and cover of the the volcano-sedimentary Martinopolé Group (ca 0.77 Ga, Fetter, et al., 2003, Santos, et al., 2008) and the Ediacaran- Early Paleozoic Jaibaras Group (Oliveira, 2001, Gomez Barroso et al, 2012), it is intruded by Brasiliano-Pan-African granites (Santos et al., 2002; Fig.1).

The deposition of Martinopolé Group is linked to extensional event around 777 ± 11 Ma, this age was determined by U-Pb zircon from the unit metarhyolites and the Jaibaras Group composed for siliciclastic and volcanics rocks deposited in the Jaibaras Basin, associated with the reactivation of the Transbrasiliano lineament, during the Brasiliano-Pan African orogeny (622-535 Ma).

The Ubajara Group represents a proximal platform sequence (Costa et al., 1973; Radambrasil, 1981, Hackspacher, et al; 1988), the type area is located along the road BR 222 between Aprazível and Saco towns, roughly 300 km of Fortaleza city (Ceará State)(Fig.1). This sedimentary sequence reaches about 3000 m in thickness and is composed from base to top of: (a) Trapiá Formation sandstones (b) Caiçaras Formation, fine-grained quartzites passing into red, finely laminated siltstones (c) Frecheirinha Formation, pink and dark gray limestones and subordinated marls at the base and gray limestones with microbial lamination at the top; (d) Coreaú Formation, sandstones and graywackes (Fig.2)

The contact between the base of the Ubajara Group and the basement is not exposed, thrust into the Saquinho sequence and Martinópolis Group with northeastward vergence. The Jaibaras Group overlies the Ubajara Group with erosional unconformity (Oliveira, 2000; Santos et al., 2008). Gomes Barroso et al. (2012) reported the occurrence in the Jaibaras Group of typical Ediacaran fossils such as *Charniodiscus*, *Cyclomedusa*, *Ediacaria*, *Medusinites*, *Palaeophragmodyction*, *Kimberella* and *Parvancorina*. The assemblage is similar to that occurring in the White Sea, and, therefore, of late Ediacaran age (560-542 Ma, Narbonne, 2005; Fedonkin et al., 2007). These biostratigraphic data provide a minimum age constraint for the Frecheirinha Formation.

The age of the Ubajara Group is still uncertain due to the lack of reliable radiometric ages. The minimum age is constrained by the following Rb-Sr ages: (a) Rb-Sr age of 560 ± 19 Ma determined for the Coreau dike swarm, which cuts the sequence (Sial & Long, 1987) and (b) a Rb-Sr age of 540 ± 24 Ma (Sial, 1981) and U-Pb age of 532 ± 24 Ma (Fetter et al., 2003) obtained for the Mucambo Granite which intrude the group and develops an important contact aureole.

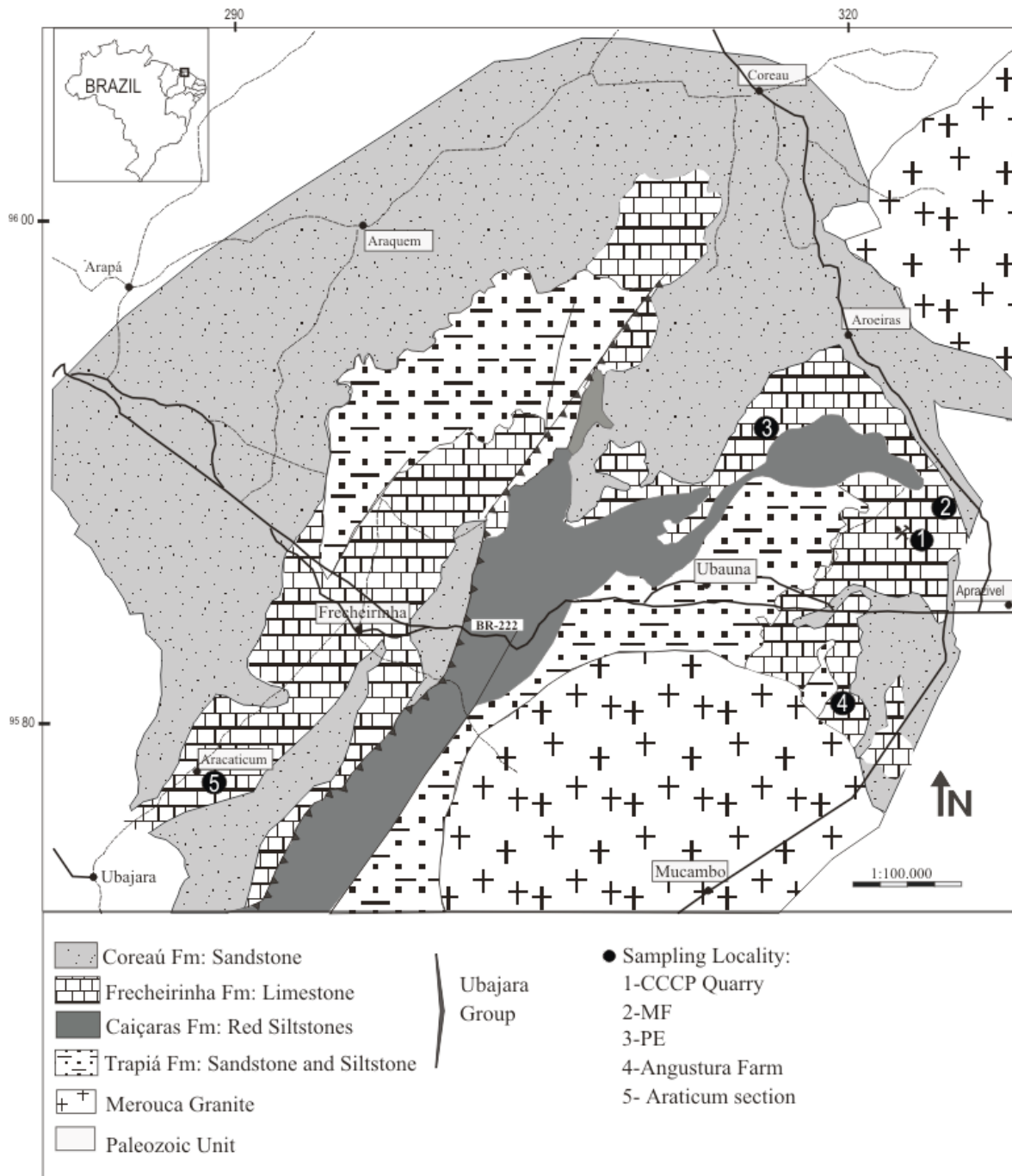


Figure1. Geological map of the type area, showing the location of different section studied
(Modified from Costa et al. 1979)

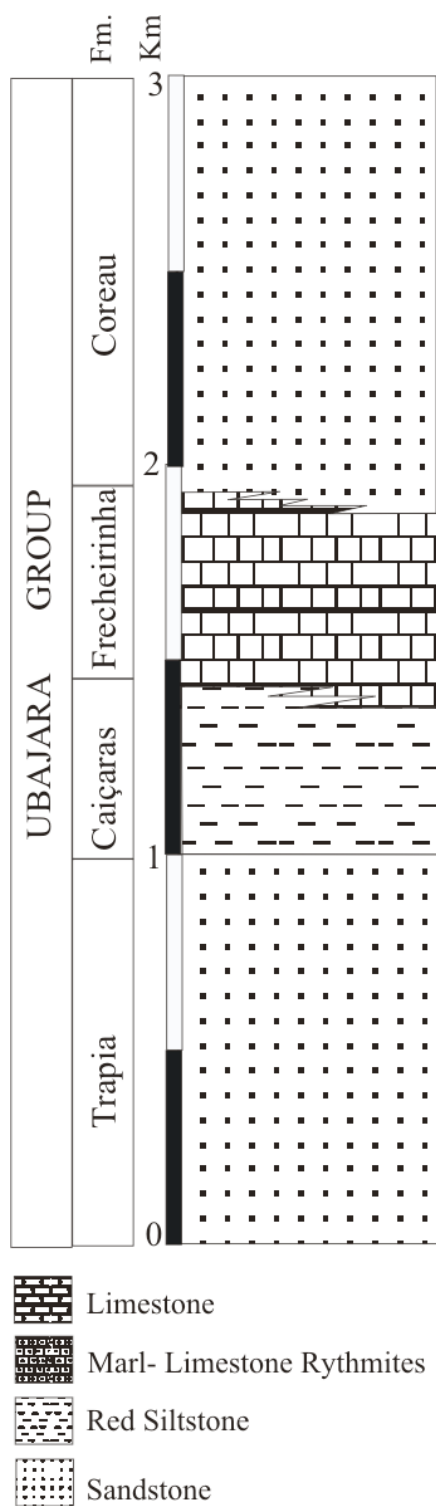


Figure 2. Stratigraphic column Ubajara Group.

3. Materials and Methods

Carbon and oxygen isotope analyses were performed at the Stable Isotope Laboratory (LABISE) of the Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil. Least altered samples were microdrilled with 1 mm drill and CO₂ was extracted from these carbonate sample in high vacuum line after reaction of 10-20 mg with phosphoric acid at 25°, and cryogenically cleaned, according to the method described by Craig (1957). CO₂ released was analyzed for O and C isotopes in a double inlet, triple collector mass spectrometer (VG Isotech SIRA II or Thermofinnigan Delta V Advantage), using the BSC reference gas (Borborema skarn calcite) that calibrated against NBS-18 (carbonatite), NBS-19 (toilet seat limestone) and NBS-20 (Solenhofen limestone), has a $\delta^{18}\text{O}$ value of -11.3‰ V-PDB and $\delta^{13}\text{C}$ -8.6‰ V-PDB. The external precision based on multiple standard measurements of NBS-19 was better than 0.1‰ for carbon and oxygen. The results are expressed in the δ -notation in parts per thousand in relation to the international V-PDB scale. Samples for Sr isotopic analyses were pre-treated with ammonium acetate to remove adsorbed Sr (Montañez et al., 1996) and then leached in 0.5 M acetic acid and centrifuged to separate the dissolved and insoluble fraction. Sr was eluted from solution by ion exchange chromatography using Sr-Sepc resin. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values were determined in static mode using a Finnigan MAT 62 (TIMS) seven collector mass spectrometer at the University of Rio Grande do Sul (UFRS) Porto Alegre, Brazil. The isotopic ratios were normalized to $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of 0.1194 and the 2σ uncertainties on Sr isotope measurements. Selected samples for analyzed major and trace elements at the LABISE, by X-ray fluorescence, using fused beads and an automatic RIX-3000 (RIGAKU) unit. Fused beads were prepared using Li fluoride and Li tetraborate and uncertainties were better than 5% for Sr and Fe 10% to Mn.

Palynological macerations of carbonates were prepared at the Micropaleontology Laboratory of the Facultad de Ciencias (Montevideo). Following crushing and digestion of samples with concentrated HCl, 72% HF was applied for 24hs. The organic residues were recovered by means of a 5 μm sieve, stored in glass flasks and mounted with glycerin-gelatine on standard glass slides. Microfossils were determined under a Leica DM LP polarizing microscope, using both transmitted and reflected light.

4. Studied sections and whole-rock geochemistry

The Frecheirinha Formation is a carbonate unit about 500 m in thickness, the type area is located near the Frecheirinha town and the best exposures are observed at the quarry of the Companhia Cearense de Cimento Portland (CCCP), north of the Aprazível village. The strata exhibit very intense ductile deformation recorded by folds with axes oriented NE-SW and low-grade metamorphism. Five sections of the Frecheirinha Formation were selected for this study (Fig. 1): the Angustura and Araticum sections, CCCP Quarry and Aroeira- Ibauna road.

The carbonates of the lower Frecheirinha Formation are well exposed at Angustura Farm (ANG samples) and Araticum sections (ARAT). The Angustura Farm section is characterized by limestones and marls rhythmites to the lower part, to gray laminates limestones toward the top. (Fig.3.c). The geochemistry comprises (expressed as wt%) CaO between 51.8 - 46.86 (n = 10), MgO between 2.4 -1.0 (n =10), SiO₂ between 7.2 - 2.4 (n = 10), MnO between 0.11- 0.02 (n = 10) and high Sr concentrations up to 2853 ppm.

The Araticum (ARAT) carbonates are marls and limestones rhythmites in the lower part and dark gray to black, finely laminated, organic-rich limestones in the upper sections. The geochemistry is: CaO between 27.0 - 56.2 % (n=13), MgO between 9.2- 0.36 % (n=13), SiO₂ between 24.0-1.6 % (n=13), MnO between 0.01-0.04 % (n=13) and high Sr concentrations around 3399 ppm. Thin sections of the dark limestones show abundant framboidal pyrite, indicating reducing conditions in the sedimentary environment.

The lower to middle part of the Frecheirinha Formation was sampled on core material at the CCCP Quarry (Sial et al., 2000) and also at Frecheirinha Mine (MF samples). This profile is characterized by gray, fine and laminated limestones (Fig.3.d), with the following composition: CaO between 50.0-10.4 % (n=13), MgO between 12.5-1.5 % (n=13), SiO₂ between 47.1-4.6 % (n=13), and between 0.2 y 0.02 % (n=13). Carbonates cropping out along the Aroeira- Ibauna Road (PE samples), represent the top of the unit, and are characterized by stromatolitic limestones (Fig.3.g.h). The geochemistry is: CaO between 53.1- 51.9 % (n=4), MgO between 1.3-1.1 % (n=4), SiO₂ between 4.3-1.7 % (n=4), MnO between 0.05 -0.01 % (n=4) and high Sr concentrations around 2800 ppm.

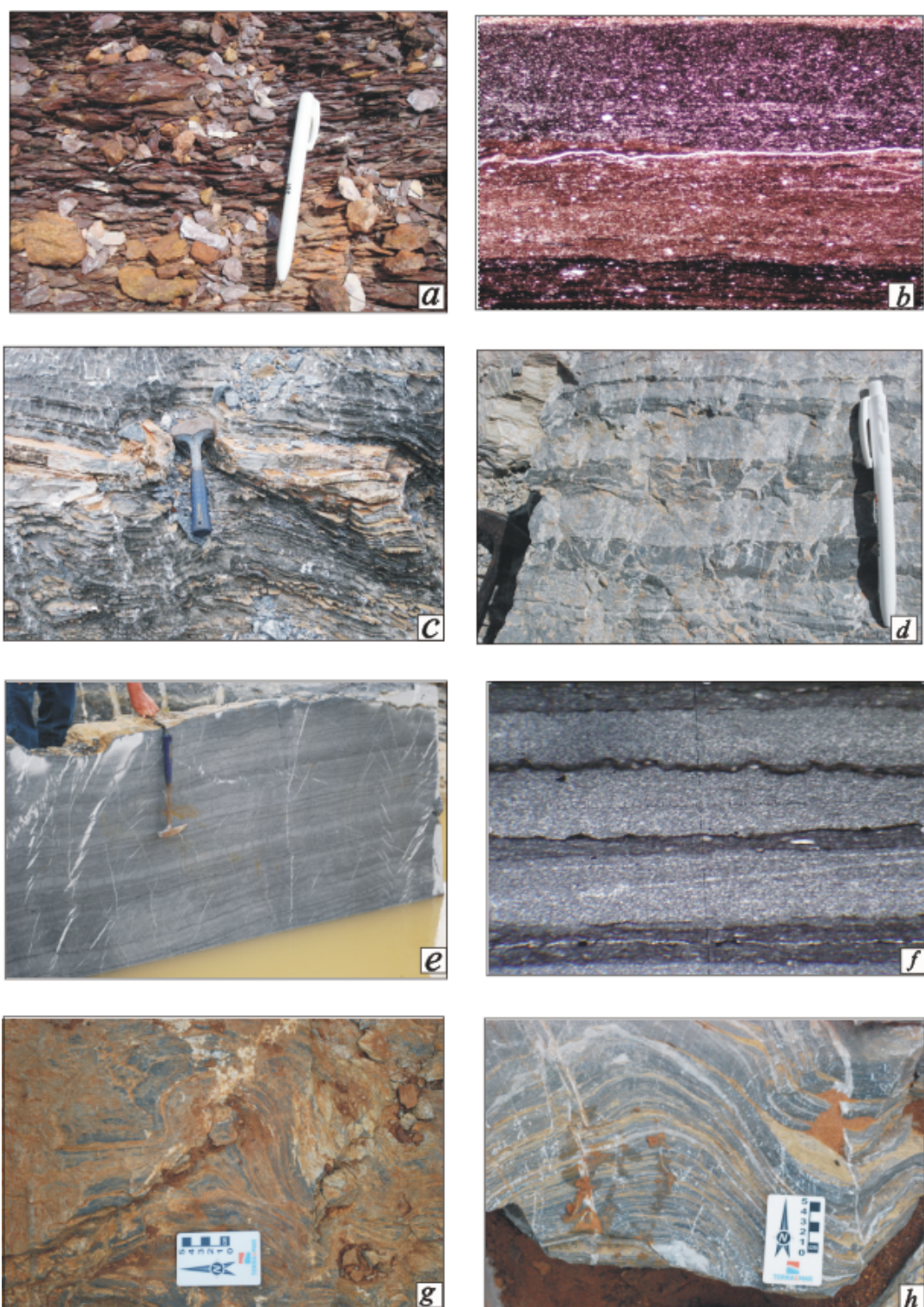


Figure 3. Typical lithofacies of studied units. (a) Red, finely laminated siltstones of Caiçaras Formation, (b) Thin section of ferruginous facies of Caiçaras Formation; (c) Limestones and marls rhythmites of Angustura Farm (ANG) section; (d) Finely laminated gray limestone; (e) Columnar stromatolites of PE section; (h) Detail view of stromatolite structure (PE).

5. Nature of isotopic signals

Samples were screened using different alteration proxies, such as $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, Mn/Sr vs. $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{13}\text{C}$ vs [Sr] (Marshall, 1992; Derry et al., 1992; Kaufman and Knoll, 1995; Jacobsen and Kaufman, 1999; Melezhik et al., 2001). Even though “threshold values” (e.g. $\delta^{18}\text{O} > -10\text{‰}$; Mn/Sr < 2) have been extensively used in the past as a means of assessing post-depositional alteration, we consider co-variation of $\delta^{13}\text{C}$ with geochemical and isotopic proxies to be a more robust criteria. This approach enables us to take into account the different mineralogy of carbonate samples (limestones, dolomitic limestones, dolostones, marl), which are characterized by different primary $\delta^{18}\text{O}$, Mn/Sr and [Sr] values.

The $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ crossplots (Fig.4 and 5) of all sections show some co-variation reflecting a degree of diagenetic/metamorphic alteration, because the $\delta^{18}\text{O}$ is sensitive to isotopic exchange with meteoric or hydrothermal fluids and causing a decrease of them (Marshall, 1992; Kaufman and Knoll, 1995). $\delta^{13}\text{C}$ shows clear co-variation with Mn/Sr for the Frecheirinha Mine and Angustura Farm sections, and poor or no co-variation for the Araticum and CCCP Quarry sections (Fig.3 and 4.). On the other hand, $\delta^{13}\text{C}$ vs [Sr] seems to be a more sensitive proxy than Mn/Sr in the studied units, showing co-variation for all sections (Fig.3 and 4). In the CCCP Quarry section we discarded two samples showing very negative $\delta^{13}\text{C}$ values (-8‰) paired with anomalously low Sr concentration (Fig.4.a), even though post-depositional alteration is not evident in the $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ crossplot. Likewise, in the middle part of the Angustura Farm section moderately negative values are interpreted as resulting from secondary alteration.

The Ubajara Group is intruded by granitic bodies that develop important contact aureoles such as the Mucambo Granite (Sial et al, 1989. Fig. 1), which would explain the very low $\delta^{18}\text{O}$ values, observed for the MF, CCCP and ANG sections, and may be the cause of post-depositional alteration. However, most samples studied retain near-primary $\delta^{13}\text{C}$ values and can therefore be used for chemostratigraphy.

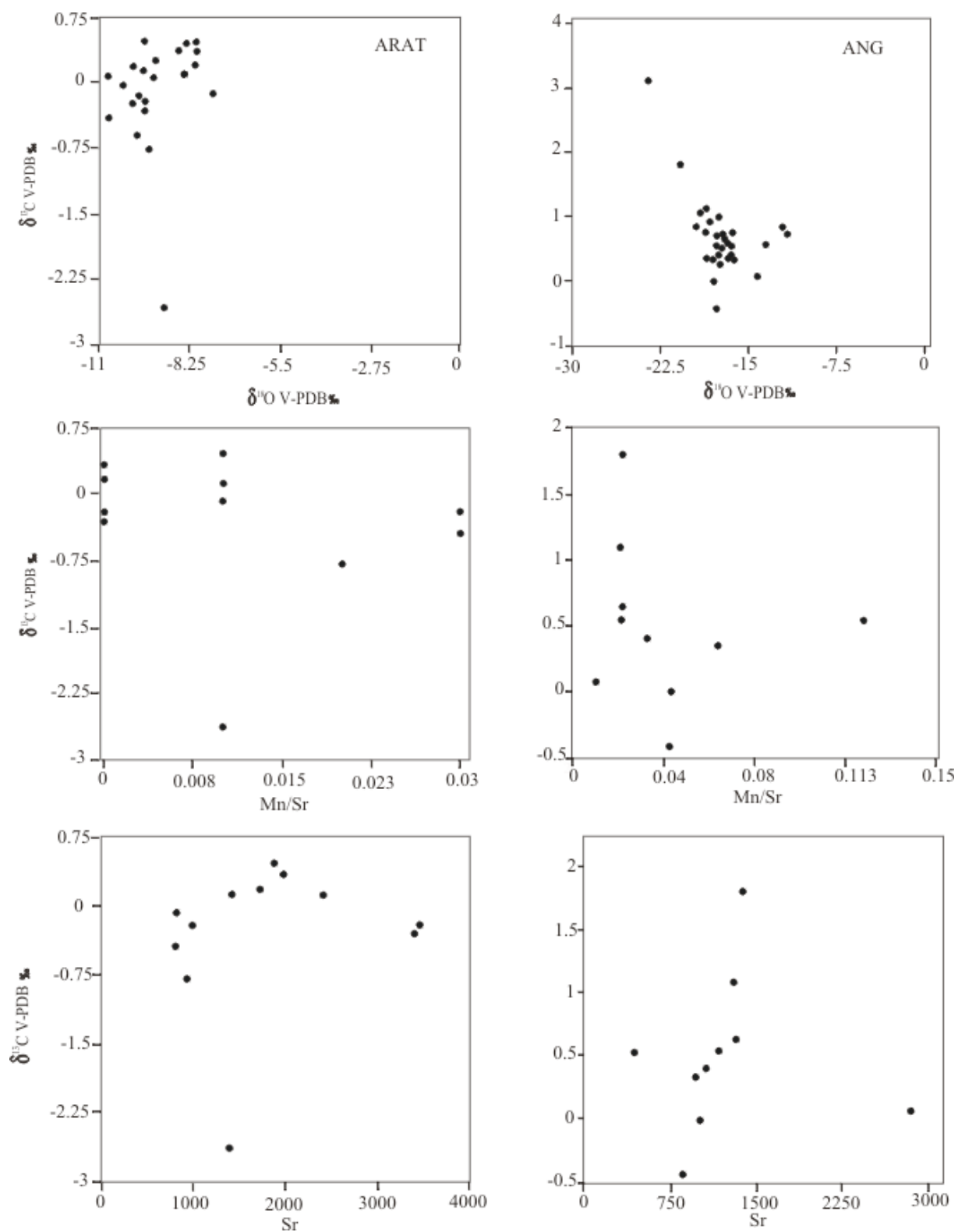


Figure 4. Crossplots of $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ vs Mn/Sr and $\delta^{13}\text{C}$ vs Sr for limestones for the Araticum (ARAT) and Angustura Farm sections (ANG)

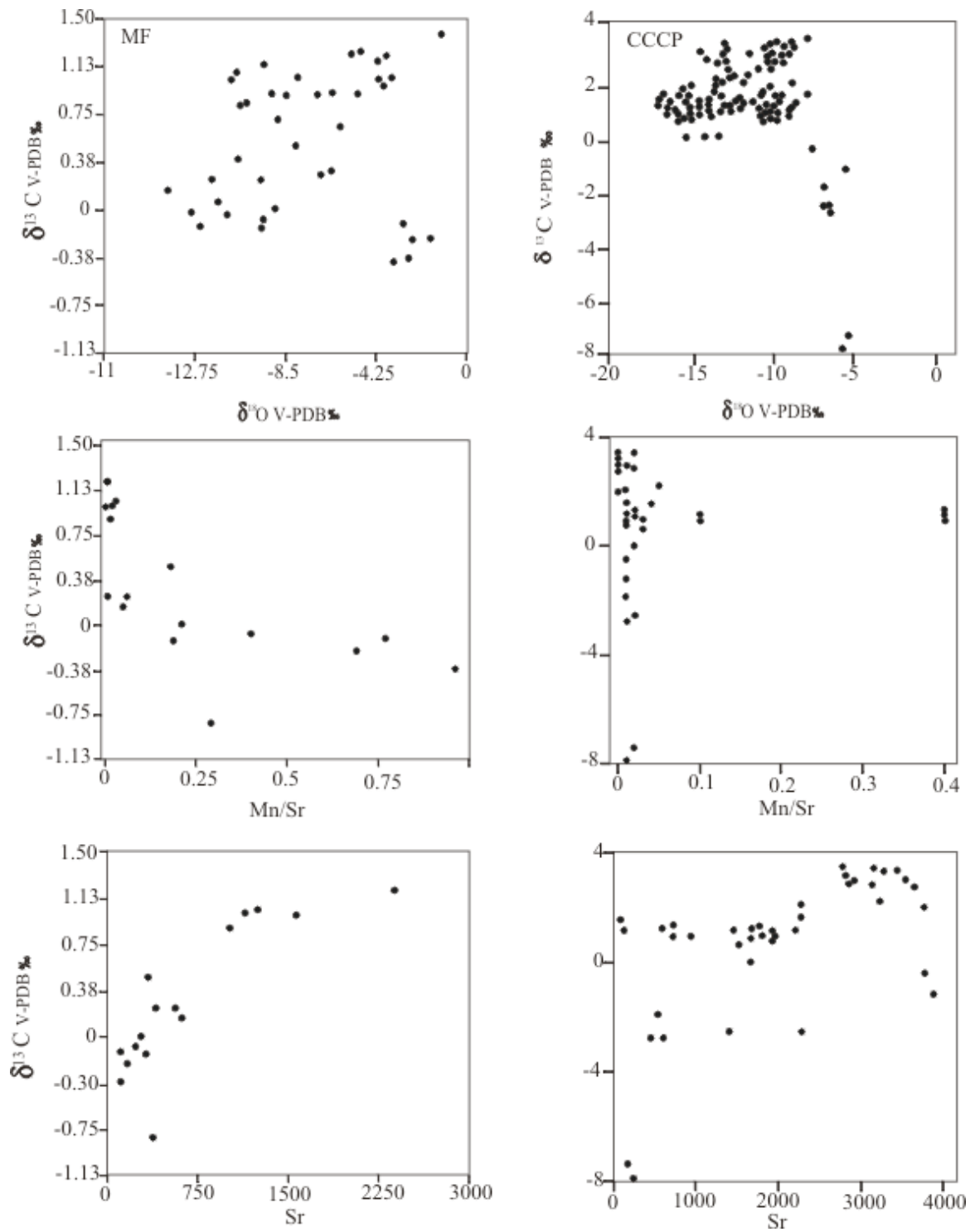


Figure 5. Crossplots of $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ vs Mn/Sr and $\delta^{13}\text{C}$ vs Sr for the limestones of Mine Frecherinha(MF) and Companhia Cearense de Cimento Portland (CCCCP)

6. Chemostratigraphy

The samples were collected approximately every meter along the profiles, with a total of 115 analyses of C and O isotopes, in addition to analyses already reported by Sial et al. (2000).

The dark gray to black, laminated limestones of the Araticum section (**Fig. 5.c**) starting with a negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion (-3 ‰), followed by values that oscillate around 0 ‰, similar to the lower part of the Frecheirinha Mine section (**Fig. 5d**). Up section, $\delta^{13}\text{C}$ values increase, reaching +2.4 ‰ at the top. The Angustura Farm profile (**Fig. 5b**) is characterized by limestone-marl rhythmites at the base, with positive $\delta^{13}\text{C}$ values around +1 ‰, which pass toward the top into gray limestones characterized by increased $\delta^{13}\text{C}$ values of up to +3.1 ‰. Stromatolitic limestones of the upper Frecheirinha Formation are exposed in the Aroeira-Ibauna road profile (PE samples) (**Fig. 5.e**), and yielded negative $\delta^{13}\text{C}$ values (-3 ‰) at the base that change abruptly to positive $\delta^{13}\text{C}$ values up to +3 ‰ for the rest of the section.

All five sections show very similar patterns of $\delta^{13}\text{C}$ evolution. The $\delta^{13}\text{C}$ curve thus obtained for the Frecheirinha Formation is characterized by:

- (a) negative $\delta^{13}\text{C}$ values down to - 3.5 ‰ for the carbonates at the base, followed by
- (b) a positive excursion comprising the middle and upper Frecheirinha Formation, with $\delta^{13}\text{C}$ values reaching peak values of +3.7 ‰.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values between 0.7075 and 0.7080 were reported by Sial et al(2003) from the upper part of the CCCP Quarry section (Fig. 5.a).

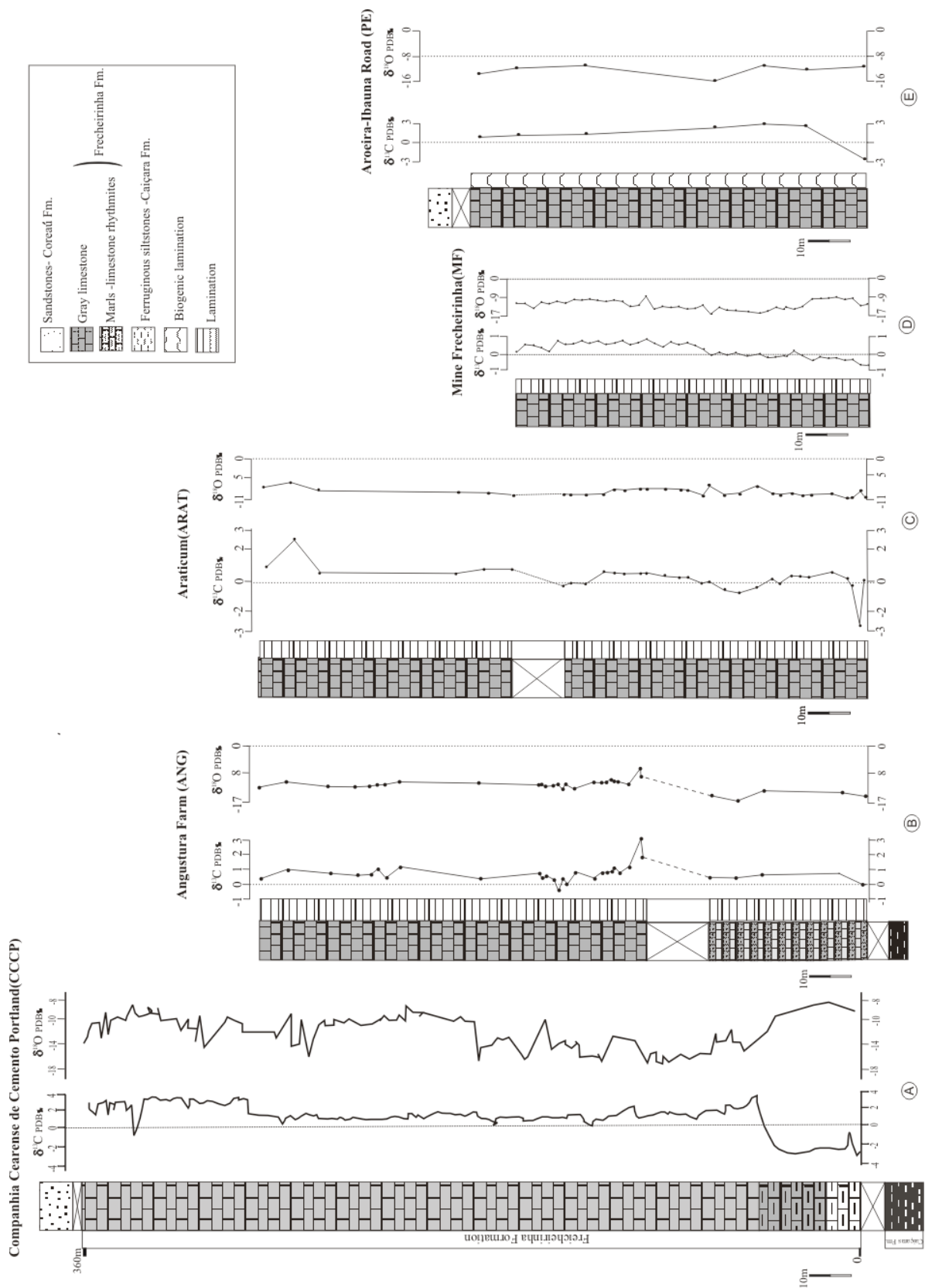


Figure 6 . Litho- and chemostratigraphic profiles of the Frecheirinha Formation.(a) Comapahia Cearense de Cimento Portland (CCCCP) (Sial et al, 2000); (b) Angustura Fram section.(c) Araticum section; (d) Mine Frecheirinha (MF) section for CCCC quarry; (e) Aroeira-Ibauna(PE) section.

7. Acritarch biostratigraphy

An occurrence of carbonized acritarchs present in carbonates and marls of the Frecheirinha Formation at the Araticum section, which exhibit a range of colors from dark gray to black and opaque, suggesting metamorphic temperatures exceeding of 200-250 °C (Teichmüller et al., 1998). This is consistent with the occurrence of tremolite in the Angustura section, which indicate the beginning of the greenschist facies.

Despite the advanced thermal alteration of acritarchs, they can be classified using reflected light techniques. Three different forms were identified:

- (1) *Leiosphaeridia minutissima* Naumova (1949), emend. Jankauskas et al. (1989): psilate, thin-walled acritarchs ranging between 10 and 70 µm in diameter (Fig.6)
- (2) *Leiosphaeridia tenuissima* Eisenack (1958): psilate, thin-walled acritarchs ranging between 70 and 80 µm in diameter and exhibiting common, concentric folds (Fig.6).
- (3) *Bavlinella faveolata* (Schepeleva) Vidal (1976), synonym of *Sphaerocongregus variabilis* Moorman (1974): single spheroidal vesicles made up of dozens of tightly packed, micron-sized (1-3 µm) microspheres. They occur both in palynological macerations, as carbonized remains, or in thin sections largely replaced by hematite. Diameter of colonies vary between 20 and µm. (Fig.6)

Both *Leiosphaeridia* and *Bavlinella* are long-ranging microfossils, but occur as an assemblage in the early and latest Ediacaran successions worldwide (e.g. Germs et al., 1986; Gaucher et al., 2003, 2008; Gaucher and Germs, 2006; Grey et al., 2003). Gaucher and Sprechmann (2009) recognize two similar assemblages in the Ediacaran: the Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora (EELP) following the suggestion of Grey et al. (2003) and the younger Late Ediacaran Leiosphere Palynoflora (LELP). The main difference resides in the larger size of leiosphaerids and the less abundance of *Bavlinella* in the EELP as compared with the LELP (Gaucher and Sprechmann, 2009). Considering the age constraints mentioned above for the Frecheirinha Formation, we tentatively assign our fossil material to the EELP assemblage.

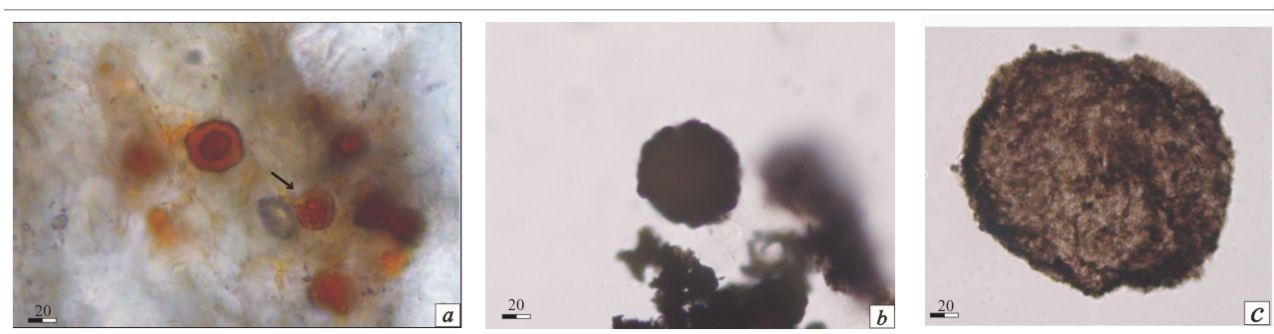


Figure 7. Acritarchs determined for Araticum section. (a) *Bavlinella faveolata* (Scheppeleva) Vidal (1976) single vesicles, in thin sections largely replaced by hematite; (b) *Bavlinella faveolata*, carbonized specimen; (d) *Leiosphaeridia tenuissima* Eisenack (1958)

8. Discussion

The age of the Frecheirinha Formation is constrained by the following data:

- (1) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values between 0.7075 - 0.7080 (Sial et al, 2003),
- (2) Negative $\delta^{13}\text{C}$ values at the base of -3.5 ‰, passing up section into a positive excursion with maximum values of +3.7 ‰
- (3) An acritarch assemblage associated either with Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora (EELP), or with the Late Ediacaran Leiosphere Palynoflora (LELP).
- (4) Basic dykes crosscut the unit and yielded a Rb-Sr isochron of $560 \pm 19\text{Ma}$
- (5) Soft-bodied macrofossils of the Ediacara Fauna, which can be assigned to the White Sea assemblage (Narbonne, 2005), were preliminary described from the overlying Jaibaras Group.

These data taken together suggest an early Ediacaran depositional age for the unit between 635 and 580 Ma (Jacobsen and Kaufman, 1999; Melezhik et al., 2001; Gaucher and Sprechmann, 2009;

Halverson, 2010). An age between 580 and 560 Ma is unlikely, because complex acantomorph acritarchs characteristic of that period (ECAP assemblage: Grey et al., 2003) do not occur in the Frecheirinha Formation.

Two glacial events, associated with negative $\delta^{13}\text{C}$ excursions, are defined in the 635-580 Ma period: the end-Cryogenian (~ 635Ma) and Gaskiers (582 Ma, Bowring et al., 2003, Kaufman and Knoll, 1995; Hoffman et al., 2002; Frimmel, 2010; Halverson, et al., 2010). However, no glacial rocks were described so far from the Ubajara Group (Costa, et al., 1979; Hackspacher, et al., 1988). The lithologies at the base are coarse sandstones of the Trapiá Formation and fine sandstones and red ferruginous laminated siltstones of the Caiçaras Formation (Fig.2a). The lamination of the siltstones is characterized by intercalated, iron rich levels with up to 60% iron oxide and fine, light brown, massive siltstones. The ferruginous facies may show fine inner laminations, and quartz-feldspathic, subangular clasts with sizes ranging from millimeters to 1 cm; some of them clearly cut lamination (Fig. 2.b). These rhythmites represent an environment below fair-weather wave base, where the high percentage of iron oxides suggest an important input of iron during deposition. The presence of iron formations, including BIF, is a recurring feature in Ediacaran units, such as the Rapitan-type banded iron formation of the Jacadigo Group (Alvarenga et al., 2011) and diamictites of the Puga Formation (Piacentini et al., 2007), located in the southern Paraguay Belt. Detrital zircon ages range from 706 to 1990 Ma. (Babinski et al., 2013), Ar-Ar ages on cryptomelane of 587 ± 7 Ma (Piacentini et al., 2013) and stratigraphic relationships (Alvarenga et al., 2011) suggest either a end-Cryogenian or Gaskiers age for the Jacadigo Group and the correlative Puga Formation. The Puga Formation is overlain in the southern Paraguay Belt by the late Ediacaran Tamengo Formation (Gaucher et al., 2003, Boggiani et al., 2010).

In the northern Paraguay Belt, a glacial diamictite is overlain by the Araras Group including a cap dolomite of the Mirassol d'Oeste Formation (Alvarenga et al., 2008). These diamictites are likely older than the Puga Formation *sensu stricto* in the southern Paraguay Belt (Alvarenga et al., 2011). The Gaskiers glaciation is represented in the northern Paraguay belt by diamictites of the Serra Azul Formation (Alvarenga, et al., 2007) in the upper Araras Group.

The absence so far in the Ubajara Group of clear glacial deposits and sedimentary features typical of post-glacial cap carbonates (Hoffman and Schrag, 2002) do not allow us to relate the Freicherinha Formation to any glacial event. Alternatively, negative isotopic-C values at the base of the unit may be related with periods of low plankton bioproductivity or sea level fluctuations (Gaucher et al., 2004; Frei et al., 2011).

Siltstones of the Caiçaras Formation represent a transgression, and the ferruginous facies could be explained by the ferruginous ocean hypothesis of Canfield et al. (2008). The authors propose that most of the Neoproterozoic oceans had low concentrations of sulphate and large amounts of dissolved iron as Fe^{2+} . BIFs not related to glacial events occur in the late Ediacaran Arroyo del Soldado Group in Uruguay (Gaucher et al., 2004; Frei et al., 2013) and also in the Seridó Group (Sial et al., 2011; Sena Campos, 2011). Ferruginous deep water conditions were probably more common than is believed in the Ediacaran ocean.

9. Conclusions

The Ubajara and Jaibaras groups are potentially important for our understanding of Ediacaran biogeochemical evolution. Soft-bodied Ediacaran macrofossils, acritarchs and thick carbonate deposits are important for the understanding both the biota and concomitant changes in seawater isotopic composition.

The C-isotope curve obtained for the Frecheirinha Formation is characterized by negative values at the base of -3.5 ‰, passing up section into a positive excursion with maximum values of +3.7 ‰ with negative. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values range between 0.7075 and 0.7080. Preliminary palynological studies yielded a low-diversity microflora comprising *Leiosphaeridia* and subordinated *Bavlinella*. These data, combined with minimum age constraints of 560 Ma provided by crosscutting mafic dykes, suggest an early Ediacaran depositional age between 635 and ca. 580 Ma.

The lack of clear glacial deposits and typical cap carbonates suggest that the negative $\delta^{13}\text{C}$ values at the base of the unit may be related to other processes, such as sea-level or bioproductivity oscillations.

10. Acknowledgements

We thank Gilsa M. Santana and Vilma S. Bezerra for assistance with stable isotope analyses in the LABISE. This study was partially supported by grants to ANS (CNPq 470399/2008, CNPq 472842/2010-2, and FACEPE APQ 0727-1.07/08). This is the NEG-LABISE contribution n. 260.

References

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews* 17: 1-29.
- Alvarenga, C.J.S., Figueiredo, M.F., Babinski, M., Pinho, F.E.C., 2007. Glacial diamictites of Serra Azul Formation (Ediacaran, Paraguay Belt): Evidence of the Gaskiers glacial event in Brazil. *Journal of South American Earth Science* 23: 236-241.
- Alvarenga, C.J.S., Boggiani, P.C., Babinski, M., Dardenne, M.A., Figueiredo, M.F., Dantas, E.L., Uhlein, A., Santos, R.V., Sial, A.N., Trompette, R., 2011. Glacially-influenced sedimentation of the Puga Formation, Cuiabá Group and Jacadigo Group, and associated carbonates of the Araras and Corumbá groups, Paraguay Belt, Brazil. *Geological Society of London, Memoir* 36, 487–497.
- Babinski, M., Boggiani, P.C., Trindade R.I.F., Fanning, C.M., 2013. Detrital zircon ages and geochronological constraints on the Neoproterozoic Puga diamictites and associated BIFs in the southern Paraguay Belt, Brazil. *Gondwana Research* 23: 988–997.
- Barroso Gomez, F., Sales Viana, M.S., Agostinho, O.M.S., Lima Filho, F.M., 2012. Primeira Ocorrência da Fauna Ediacara No Nordeste Do Brasil. En: I Simpósio Brasileiro de Paleoinvertebrados. UNESP. São Paulo, Brasil
- Berger, W.H. and Vincent, E. (1986) Deep-sea carbonates: reading the carbon isotope signature. *Geol. Rundsch.*, 75, 249–269.

- Bingen, B., Griffin, W. L., Torsvik, T. H., and Saeed, A., 2005. Timing of late Neoproterozoic glaciation on Baltica constrained by detrital geochronology in the Hedmark Group, southeast Norway. *Terra Nova* 17: 593–596.
- Brito Neves, B.B., 1983. Regionalização geotectônica do pré-Cambriano nordestino. Thesis, Universidade de São Paulo, p.198.
- Brito Neves, B.B., Cordani, U.G., 1991 Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research* 53: 23-40.
- Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Fetter, A.H., 2002. North-western Africa-North-eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Science* 34: 275-278.
- Bowring, S., Myrow, P., Landing, E., Ramezani, J., Grotzinger, J., 2003. Geochronological constraints on terminal Neoproterozoic events and the rise of metazoans. *Geophys. Res. Abstr.* 5, 13219
- Caby, R., Sial, A.N., Arthaud, M.H., Vauchez, A., 1991. Crustal evolution and the Brasiliano orogeny, northeast Brazil. In Dallmeyer, R.D., Lécroché, J.P. (Eds), *The West African orogens and circum-Atlantic correlative*. Springer-Verlag, pp. 373-397.
- Calver, C.R. (2000) Isotope stratigraphy of Ediacaran (Neoproterozoic III) of the Adelaide Rift Complex, Australia, and overprint of water column stratification. *Precambrian Research*, 100: 121-150.
- Canfield, D.E., Poulton, S.W., Knoll, A.H., Narbonne, G.M., Ross, G., Goldberg, T., Strauss, H., 2008. Ferruginous Conditions Dominated Later Neoproterozoic Deep-Water Chemistry. *Science* 321: 949-952.
- Condon, D., Zhu, M., Bowring, S., Wang, W., Yang, A., Jin, Y., 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science* 308: 95-98
- Costa, J. M.; De França, J.B.; Cavalcante Lins, C.A.; Bacchiega, I.F.; Habekost, C.R.; Barbosa da Cruz, W., 1979. Geologia da Bacia Jibaras Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. Ministerio das Minas e Energias. Departamento Nacional Da produção Mineral. Série Geologia N°14, Seção Geologia Básica N°11, p. 106.
- Craig, H., 1957. Isotope standard for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometry analysis of carbon dioxide. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 12: 133-149.

- Dantas, E.L., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Brito Neves, B.B., Cordani, U., Nutman, A.P., Williams, I.S., 2004. The 3.4-3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research* 130: 113-137.
- Derry, L.A., Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B., 1992. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: evidence from stable and radiogenic isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59: 1317-1329.
- Eisenack, A., 1958. *Tasmanites* Newton 1875 und *Leiosphaeridia* n.g. als Gattungen der Hystrichosphaeridia.- *Paleontographica*, Abteilung A, 110, 1- 19.
- Fedonkin, M. A., Simonetta, A. and Ivantsov, A. Y., 2007. New data on Kimberella, the Vendian mollusc-like organism (White Sea region, Russia): palaeoecological and evolutionary implications. *Geological Society, London, Special Publications*; v. 286; p. 157-179
- Fetter, A.H., 1999. U–Pb and Sm–Nd geochronological constraints on the crustal framework and geological history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana. University of Kansas, Ph.D. Dissertation, 164 pp.
- Fetter, A.H., Van Schmus, W.R., dos Santos, T.J.S., Arthaud, M., Nogueira Neto, J.A., 2000. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implication for the existence of the Paleoproterozoic supercontinent “Atlantica”. *Revista Brasileira de Geociências* 30: 102-106.
- Fetter, A.H., dos Santos, T.J.S., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., Brito Neves, B.B., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., Wernick, E., 2003. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santana Quinteira batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implication for assembly of West Gondwana. *Gondwana Research* 6: 265-273.
- Frei, R., Gaucher, C., Stolper, D., Canfield, D.E., 2013. Fluctuations in late Neoproterozoic atmospheric oxidation- Cr isotope chemostratigraphy and iron speciation of the late Ediacaran lower Arroyo del Soldado Group (Uruguay). *Gondwana Research* 23: 797–811
- Frimmel, H.E., 2010. On the reliability of stable carbon isotopes for Neoproterozoic chemostratigraphic correlation. *Precambrian Research* 182: 239-253.
- Gaucher, C., Sial, A.N., Blanco, G., Sprechmann, P. 2004. Chemostratigraphy of the Lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and Paleoclimatic Implications. *Gondwana Research*, 7:715-730.

- Gaucher, C., Germs, G.J.B. 2006. Recent advances in South African Neoproterozoic-Early Palaeozoic biostratigraphy: correlation of the Congo Caves and Gamtoos Groups, and acritarchs of the Sardinia Bay Formation, Saldania Belt. *South African Journal of Geology*, 109: 193-214.
- Gaucher, C., Blanco, G., Chiglino, L. Poiré, D.G., Germs, G.J.B. 2008. Acritarchs of Las Ventanas Formation (Ediacaran, Uruguay): implications for the timing of coeval rifting and glacial events in western Gondwana. *Gondwana Research*, 13, 488-501.
- Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E., 2009. The Neoproterozoic and Cambrian: a time of upheavals, extremes and innovations. In: Gaucher, C., Sial, A.N, Halverson, G.P, Frimmel, H.E. (Eds): *Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Changes and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology* 16, Elsevier, pp. 3-11.
- Gaucher, C., Sprechmann, P. 2009. Neoproterozoic acritarch evolution. Neoproterozoic-Cambrian biota. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): *Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, 16, Elsevier, pp. 319-326.
- Germs, G.J.B., Knoll, A.H. and Vidal, G. 1986. Latest Proterozoic microfossils from the Nama Group, Namibia (South West Africa). *Precambrian Research*, 32, 45-62.
- Grey, K., Walter, M. R., and Calver, C. R., 2003. Neoproterozoic biotic diversification: Snowball Earth or aftermath of the Acraman impact. *Geology* 31: 459–462.
- Hackspacher, P.C., Soares, J.S., Petta, R.A. 1988. Geologia do Grupo Ubajara, região de Frecheirinha (CE). In: CONGR. BRAS. aGEOL., 35. Belém, 1988. *Anais... Belém, SBG*. v. 6, p. 2661-2677.
- Halverson, G. P., Hoffman, P.F., Kaufman, A.J. 1998 Numerically constraining the duration of Neoproterozoic carbon iso- tope excursions (abstract), *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 30: 221.
- Halverson, G.P., 2006. A Neoproterozoic Chronology. In Xiao, S. and Kaufman, A.J.(Eds), *Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology*. Springer-Verlag, pp. 231-271.
- Halverson, G.P., Wade, B.P., Hurteng, M.T., Barovich, K.M., 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Research* 182: 337-350.

- Halverson, G.P. and Shields-Zhou, G., 2011. Chemostratigraphy and the Neoproterozoic glaciations. In: Arnaud, E., Halverson, G.P. & Shields-Zhou, G. (eds) The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Geological Society, London, Memoirs 36: 51-66.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., and Schrag, D. P., 1998. A Neoproterozoic snowball Earth, *Science* 281: 1342–1346.
- Hoffman, P. F., and Schrag, D. P., 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change, *Terra Nova* 14: 129–155.
- Jankauskas, T.V., Mikhailova, N.S., Hermann, T.N., 1989. Mikrofossilii Dokembriya SSSR. [Precambrian Microfossils of the USSR] Nauka, Leningrad.
- Jacobsen, S.B., Kaufman, A.J., 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 37-57.
- Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B. and Knoll, A.H., 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate. *Earth Planetary Science Letters* 120: 409- 430.
- Kaufman, A. J. and Knoll, A. H., 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater. *Precambrian Research* 73: 27–49.
- Knoll, A. H., 2000. Learning to tell Neoproterozoic time. *Precambrian Research* 100: 3–20.
- Knoll, A., Walter, M., Narbonne, G., Christie-Blick, N., 2006. The Ediacaran Period: a new addition to the geologic time scale. *Lethaia* 39: 13-30.
- Marshall, J.D., 1992. Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geological Magazine*, 129, p. 143-160.
- Melezhik, V.A., Gorokov, I.M., Kuznestov, A.B., Fallick, A.E., 2001. Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonates: implication for “blind dating”. *Terra Nova* 13: 1-11.
- Montañez, I.P., Banner, J.L., Osleger, D.A., Borg, L.E., Bosserman, P.J., 1996. Integrated Sr isotope variations and sea-level history of Middle to Upper Cambrian platform carbonates: implications for the evolution of Cambrian seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Geology* 24: 917-920.
- Moorman, M. 1974. Microbiota of the late Proterozoic Hector Formation, southwestern Alberta, Canada. *Journal of Paleontology*, 48, 524-539.
- Moczyłowska, M. and Konstantin E. N., 2012. Ediacaran radiation of organic-walled microbiota recorded in the Ura Formation, Patom Uplift, East Siberia. *Precambrian Research* 198–199: 1–24.

- Narbonne, G. M., 2005. The Ediacara Biota : Neoproterozoic Origin of Animals and Their Ecosystems. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33:421–42
- Naumova, S.N., 1949. Spory nizhnego kambriya. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Geologicheskaya*, 49-56.
- Novais, F.R.G., Brito Neves, B.B. and Kawashita, K., 1979. Reconhecimento crono-estratigráfico na região Noroeste do Ceará. IX Simpósio de Geologia do Nordeste, Atas, Natal, p. 93-110.
- Oliveira, D.C., 2001. Revaluation of the tectono-magmatic evolution of the Jaibaras Trough (northeast Brazil). *Acta Geologica Hispanica* , v. 36 , no 1-2, p. 53-95
- Piacentini, T., Boggiani, P.C., Yamamoto, J.K., Freitas, B.T., Campanha, G.A.C., 2007. Formação ferrífera associada à sedimentação glaciogênica da Formação Puga (Marinoano) na Serra da Bodoquena, MS. *Revista Brasileira de Geociências* 37, 530–541.
- Santos, S.T.J., Fetter, A.H., Hackspacher, P.C., Van Schums, W.R., Nogueira Neto J.A., 2008. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. *Journal of South America Science* 25: 271-284.
- Sena Campos, M., Químioestratigrafia De Carbono e Estrôncio e Geoquímica de Elementos Terras Raras em Formações Carbonáticas e Ferríferas do Cinturão Seridó , Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 83p.
- Sial, A.N., 1989. Petrologia, geoquímica de elementos maiores, traços, terras raras e isótopos (Sr, O, H, S) nos batólitos da Meruoca e Mocambo, Ceará, Nordeste do Brasil. Tese de Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 284p.
- Sial, A.N., Ferreira, V.P., Almeida, A.R., Romano, A.W., Parente, C.V., Costa, M.L. and Santos., V.H., 2000. Carbon isotope fluctuations in Precambrian carbonate sequences of several localities in Brazil. *Anais da Academia Bras. de Ciências*, vol. 72 (4), 539-558.
- Sial, A.N., Ferreira, V.P., Almeida, A.R. and Moura, C.V.A., 2003. C-, O- and Sr-isotope composition and age of the carbonates of the Frecheirinha Formation, NW Ceará, Northeastern Brazil. IX Congresso Brasileiro de Geoquímica. Belém -Pará. Resumos Expandidos, 410-411.
- Sial, A.N., Ferreira, V.P., Almeida, A.R. and Moura, C.V.A. 2003. C-, O- and Sr – isotope stratigraphy of the Sturtian Jacoca and Olhos D’Água Formation, state of Sergipe, northeastern Brazil. V South American Symposium on Isotope Geology, Salvador, 394-397.

- Sial, A.N., Gaucher, C., Alves da Silva Filho, M., Ferreira, V.P., Pimentel, M.M., Lacerda, L.D., Silva Filho, E.V., Cezario, W. 2010. C-, Sr- isotope and Hg chemostratigraphy of Neoproterozoic cap carbonates of the Sergipano Belt, Northeastern Brazil. *Precambrian Research* 182: 351-372.
- Sial, A. N., Campos, M.S., Chiglino, L., Gaucher, G., Frei, R., Ferreira, V.P., Nascimento, R.C.S., and M. M. Pimentel, M.M., 2011. C isotopes, Ce and Eu anomalies in Neoproterozoic cap carbonates (?) and associated BIFs, Borborema Province, Northeastern Brazil. Abstract, Gondwana 14 Symposium, Buzios, Rio de Janeiro, Brazil, p.168
- Teichmüller, M., Littke, R., Robert, P. 1998. Coalification and maturation. In: Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R., Robert, P. (Editors), *Organic Petrology*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 86-174.
- Vidal, G. 1976. Late Precambrian microfossils from the Visingsö Beds in southern Sweden. *Fossils and Strata*, 9, 1-57.

CAPITULO IV

Acritarchs of the Ediacaran Frecheirinha Formation, Ubajara Group, Northeastern Brazil

Leticia Chiglino^{1*}, Claudio Gaucher², Alcides N. Sial¹, Valderez P. Ferreira¹

¹NEG-LABISE, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

²Facultad de Ciencias, Universidad de La República, Montevideo, Uruguay

Abstract

We report for the first time the occurrence of organic-walled microfossils in Ediacaran carbonates and marls of the Frecheirinha Formation, Ubajara Group, and the first Precambrian acritarchs so far reported from northeastern Brazil. The assemblage of the Frecheirinha Formation represents a low-diversity microflora comprising Leiosphaeridia, Lophosphaeridium and subordinated Bavlinella. On the basis of the microfossils, reported absolute ages and stratigraphic relationships, we assign the fossil assemblage to the Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora assemblage (EELP), suggesting an early Ediacaran depositional age for the unit around 635-580 Ma. The absence so far in the Ubajara Group of clear glacial deposits and sedimentary features typical of post-glacial cap carbonates do not allow us to relate the Frecheirinha Formation to any glacial event. Therefore, the negative $\delta^{13}\text{C}$ values (-3.5 ‰) at the base and positive $\delta^{13}\text{C}$ values (3.5 ‰) that characterize the rest of the unit, may be related with periods of low and high plankton bioproductivity and/or sea-level oscillations. The carbonates of the Frecheirinha Formation are potentially important for our understanding of Ediacaran biogeochemical evolution.

Keywords: Acritarchs, Ediacaran, Neoproterozoic, Northeastern Brazil

1. Introduction

The Neoproterozoic is characterized by extreme climate change, oscillations in oceanic geochemistry, a significant oxygenation event, and the diversification of the marine biota (Willman et al., 2006). Several near-global glacial events occurred between 740 and 580 Ma, considered as a bottleneck for marine biota evolution (Kaufman and Knoll, 1995; Hoffman and Schrag, 2002; Moczyłowska, 2008; Frimmel, 2010; Halverson, et al., 2010).

Neoproterozoic body fossils have been described from a few successions in Brazil, the most diverse being the assemblage preserved in the late Ediacaran Corumbá Group, Mato Grosso do Sul (e.g. Beurlen and Sommer, 1957; Zaine and Fairchild, 1985; Gaucher et al., 2003; Warren et al., 2012).

Until recently, no Neoproterozoic body fossils were known from northeastern Brazil. Soft-bodied macrofossils typical of the Ediacara Fauna, which can be assigned to the White Sea assemblage (Narbonne, 2005), were preliminary described from the Jaibaras Group, Ceará (Gomes Barroso et al., 2012). The Jaibaras Group overlies with erosional unconformity the Ubajara Group, which comprises thick carbonates of the Frecheirinha Formation. The Ubajara Group represents a proximal platform sequence, located in the Médio Coreaú Domain, Borborema Province. This Domain is characterized by graben and horst structures, which limits to the northeast with the Ceará Central Domain through the Trasbrasiliano Lineament (Caby et al., 1991, Santos et al. 2008). The age of the carbonates of the Frecheirinha Formation is loosely constrained by C- and Sr-chemostratigraphy and radiometric ages as late Neoproterozoic (Sial et al., 2003; Chiglino et al., submitted).

In this work, we describe organic-walled microfossils (acritarchs) from the Frecheirinha Formation, which contribute towards our understanding of the depositional environments, age and thermal overprint of the Ubajara Group. These are the first Precambrian acritarchs so far reported from northeastern Brazil.

2. Lithostratigraphy and age

The Ubajara Group represents a proximal platform sequence (Costa et al., 1973; Radambrasil, 1981; Hackspacher et al., 1988), the type area is located along the road BR 222 between Aprazível and Saco towns, roughly 300 km from Fortaleza city (Ceará State; Fig.1). This sedimentary sequence reaches 3000 m in thickness and is composed from base to top of: (a) Trapiá Formation sandstones (b) Caiçaras Formation, fine-grained quartzites passing into red, finely laminated siltstones (c) Frecheirinha Formation, pink and dark gray limestones and subordinated marls at the base and gray limestones with microbial lamination at the top; (d) Coreaú Formation, sandstones and graywackes. The contact between the base of the Ubajara Group and the basement is not exposed.

The Frecheirinha Formation is a carbonate unit about 500 m in thickness, the type area is located near the Frecheirinha town and the best exposures are observed at the quarry of the Companhia Cearense de Cimento Portland (CCCCP), north of Aprazível. The strata exhibit intense ductile deformation recorded by folds with axes oriented NE-SW and low-grade metamorphism. Carbonates are characterized by limestones and marly rhytmities in the lower part, passing into dark gray to gray, fine, laminated, stromatolitic limestones at the top.

The Araticum profile, located between Frecheirinha and Ubajara village (Fig. 1), was selected for the palynological study. There, limestone-marl rhythmities occur at the base, which pass into dark gray to black, finely laminated, organic-rich limestones at the top (Fig.2)

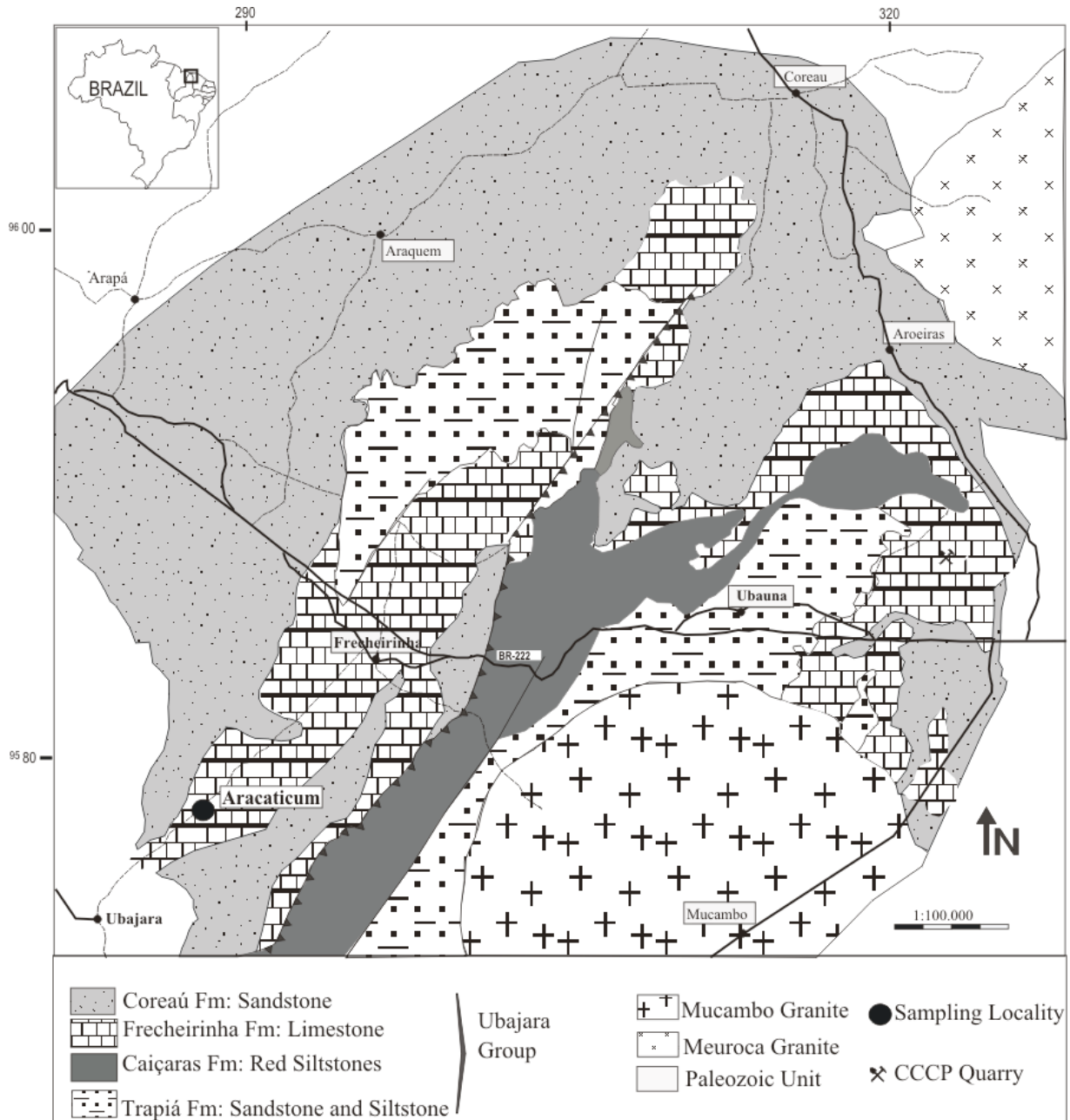


Figure 1. Geological map of the studied area, showing the Ubajara Group and sampled outcrops of the Frecheirinha Formation (Araticum Section) (Modified Costa et al, 1979).

The Jaibaras Group overlies the Ubajara Group with erosional unconformity (Oliveira, 2000; Santos et al., 2008). Gomes Barroso et al. (2012) reported the occurrence in the Jaibaras Group of typical Ediacaran fossils such as *Charniodiscus*, *Cyclomedusa*, *Ediacaria*, *Medusinites*, *Palaeophragmodyction*, *Kimberella* and *Parvancorina*. The assemblage is similar to that occurring in the White Sea, and, therefore, of late Ediacaran age (560-542 Ma: Narbonne, 2005; Fedonkin et al., 2007). These biostratigraphic data provide a minimum late Ediacaran age constraint for the Frecheirinha Formation.

The age of the Ubajara Group is still uncertain due to the lack of reliable radiometric ages. The minimum age is constrained by the following Rb-Sr ages: (a) a Rb-Sr age of 560 ± 19 Ma determined for the Coreaú dike swarm, which crosscuts the sequence (Sial and Long, 1987) and (b) a Rb-Sr age of 540 ± 24 Ma (Sial, 1981) and U-Pb age of 532 ± 24 Ma (Fetter et al., 2003) for the Meruoca Granite, which intrudes the group and develops an important contact aureole.

Chemostratigraphic data presented by Chiglino et al. (submitted) favor an Ediacaran depositional age for the Frecheirinha Formation. Combined with the biostratigraphic and radiochronologic data mentioned above, an early Ediacaran depositional age between 635 and 560 Ma is considered most probable for the unit.

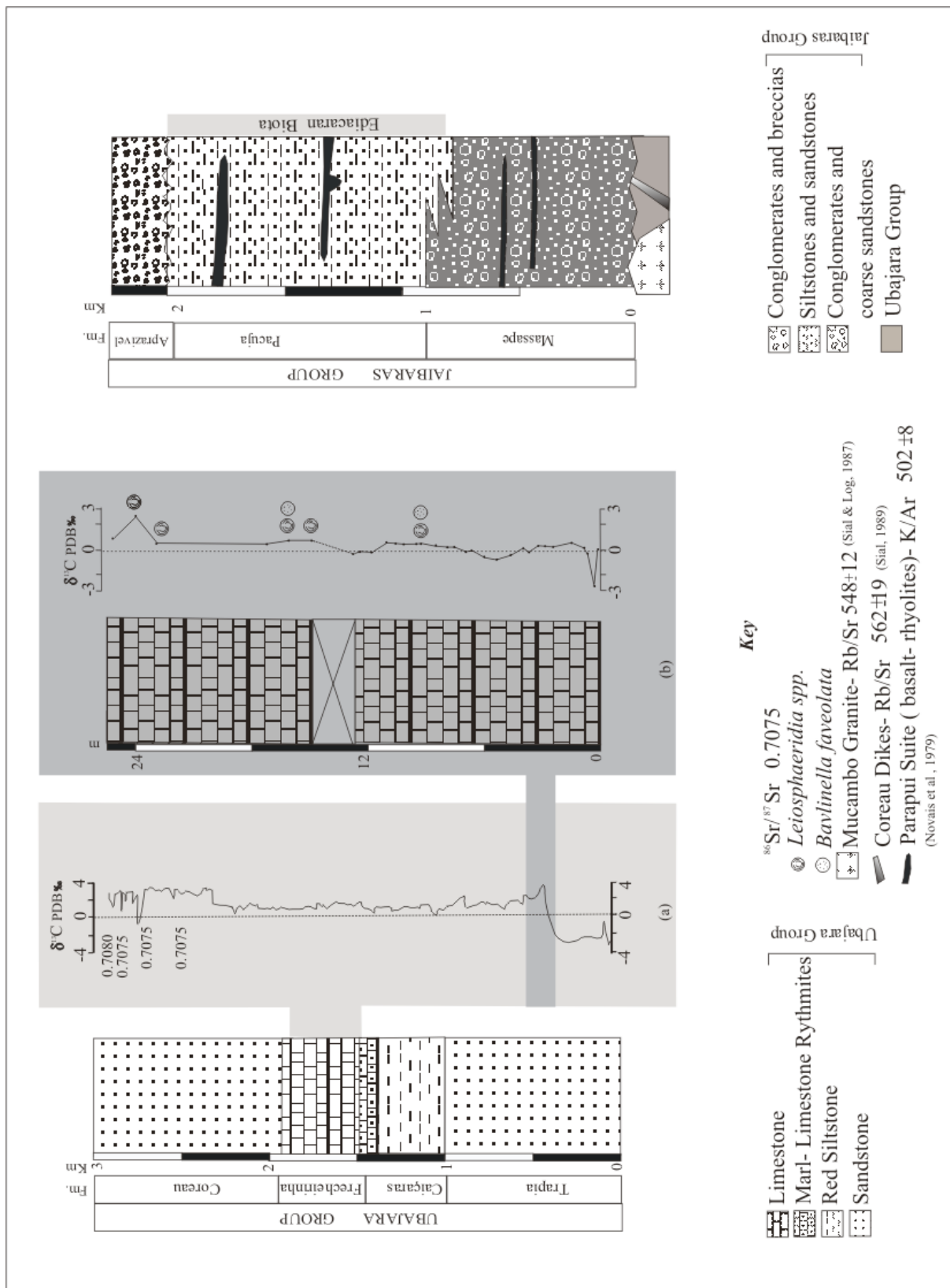


Figure 2. Lithostratigraphy of the Ubajara and Jaibaras groups, showing stratigraphic range of fossils occurring in these units.

3. Materials and Methods

Palynological macerations of carbonates were prepared at the Micropaleontology Laboratory of the Departamento de Geología, Facultad de Ciencias (Montevideo). The method avoids centrifugation or use of ultrasonic bath to avoid breakage of fragile specimens (e.g. Gaucher et al., 2008). Following crushing and digestion of samples with concentrated HCl, 72% HF was applied for 24hs. After neutralization, boiling HCl was applied to remove fluorides formed in the previous step. The remaining solution was diluted with water and the supernatant discarded after allowing at least 30 minutes for particle settling. The organic residues were recovered by means of a 5µm sieve, stored in glass flasks and mounted with glycerin-gelatine on standard glass slides. Microfossils were determined under a Leica DM LP polarizing microscope, using both transmitted and reflected light (Pflug and Reitz, 1992).

Twelve samples of carbonates and marls of the Frecheirinha Formation at the Araticum section were analyzed. Acritarch preservation is quite poor, mainly due to advanced carbonization, corrosion and fragmentation.

Despite the advanced thermal alteration of acritarchs, they can still be classified using reflected light techniques described by Pflug and Reitz (1992).

4. Results

4.1. Preservation and thermal alteration

Although entire, fairly well-preserved specimens are common, most of the organic remains are fragmentary and/or corroded to some degree. Moreover, acritarchs exhibit advanced carbonization, showing colors from dark gray to black (Figs. 3-5). Corresponding Thermal Alteration Index (TAI) ranges from 4+ to 5, suggesting metamorphic temperatures exceeding 200-250 °C (Teichmüller et al., 1998). It is not yet clear if this metamorphic overprint is of a regional nature or, more probably, related to the voluminous granitic intrusions affecting the succession, such as the Meruoca and Mucambo granites (Fig. 1).

4.2. Systematic palaeontology

Repository All palynological slides, containing specimens described here, are kept in the Precambrian collection of the Departamento de Paleontología, Facultad de Ciencias (Montevideo, Uruguay). The position of specimens in the slides are clearly marked on corresponding duplicates.

Incertae sedis

Group Acritarcha Evitt (1963)

Genus *Leiosphaeridia* Eisenack (1958), emend. Downie and Sarjeant (1963), emend. Turner (1984)

Type species: *Leiosphaeridia baltica* Eisenack (1958)

Leiosphaeridia tenuissima Eisenack (1958)

Fig. 3 a-c

- 1958 *Leiosphaeridia tenuissima* Eisenack: pl. 1.2-1.3
- 1994 *Leiosphaeridia tenuissima* Butterfield et al.: fig. 16I
- 1994 *Leiosphaeridia tenuissima* Hofmann and Jackson: figs. 12E
- 1998 *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher et al.: fig. 4.6
- 2000 *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher: pl. 11.5
- 2003 *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher and Germs
- 2004c *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher et al.: fig. 4D
- 2005a *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher et al.: fig. 8g-h
- 2008 *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher et al.: figs. 3B-I

Material. Slides Arat 29A-1, Arat 29E-7 and Arat 29E-9. Ten fairly well-preserved specimens and fragments in macerations of carbonates, Frecheirinha Formation.

Description. Thin-walled, psilate, originally spheroidal vesicles with common folds. Diameter ranging between 70 and 100µm (mean=84µm; N=5). Two different patterns of folding of the walls were observed in the vesicles, a simple, psilate sphaeromorphs with mainly concentric folds (Fig. 3.a); and vesicles with a microPLICATE wall (Fig.3.b,c).

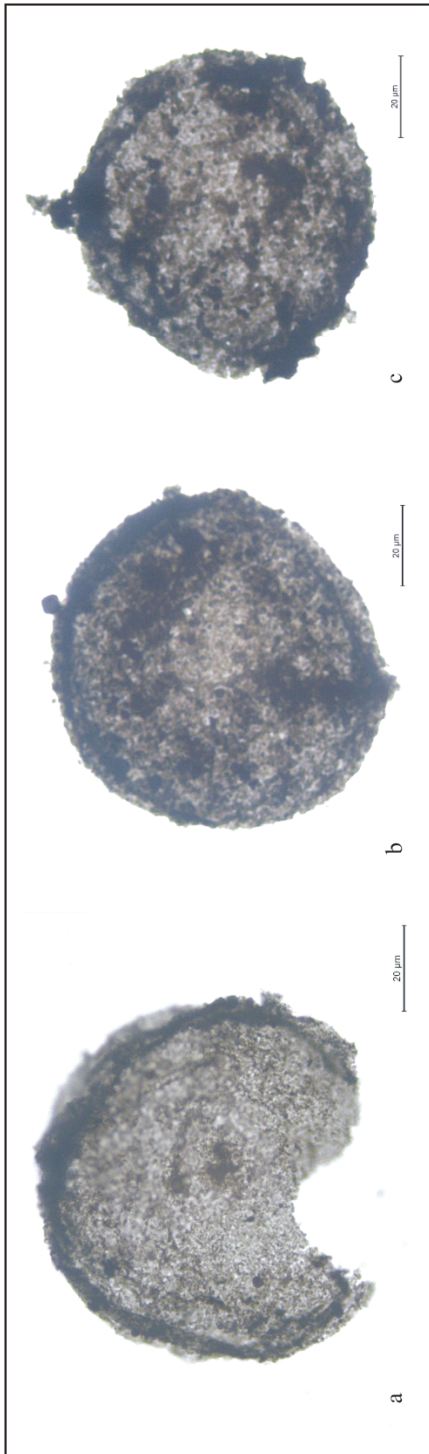


Figure 3. Sphaeromorphs of Frecheirinha Formation recovered from limestones (Araticum Section) by means of standard palynological maceration. a- *Leiosphaeridia tenuissima* Eisenack (1958), specimen Arat 29A-1, b-*L. tenuissima* Eisenack (1958), specimen Arat 29E-9, c-*L. tenuissima* Eisenack (1958), specimen Arat 29E-7.

Remarks. *L. tenuissima* is the most frequent species in the black limestones for Araticum section, and represents the base of the Frecherinha Formation. Two different wall structures are included here under *L. tenuissima*: one with a thin but still competent wall, the other with a very thin, pliable membrane. The same wall structure has been observed in specimens from other Ediacaran units in South America: Las Ventanas Formation of Uruguay (Gaucher et al., 2008), and the Sierras Bayas Group of Argentina (Gaucher et al., 2005b).

Leiosphaeridia minutissima Naumova (1949), emend. Jankauskas et al. (1989)
Fig. 4a

1992 *Leiosphaeridia minutissima* Butterfield and Chandler: figs. 3A-3I
1994 *Leiosphaeridia minutissima* Hofmann and Jackson: figs. 15.9-15.15, 15.16
1996 *Leiosphaeridia minutissima* Hofmann and Jackson: figs. 12A-C
2000 *Leiosphaeridia minutissima* Gaucher: p. 66
2008 *Leiosphaeridia tenuissima* Gaucher et al.: fig. 3A

Material. Slides ARAT 20B, 29A-5, 29B, 34A and 35A, few specimens and vesicle-fragments in palynological macerations of carbonates, Frecheirinha Formation.

Description. Thin-walled and, psilate, originally spheroidal vesicles with common, irregular to concentric folds. Diameter ranging from 40 to 70 μm (mean= 57 μm ; N=3; Fig.3.a).

Remarks. The specimens show irregular folds on the wall which appear as darker patches and soft waves.

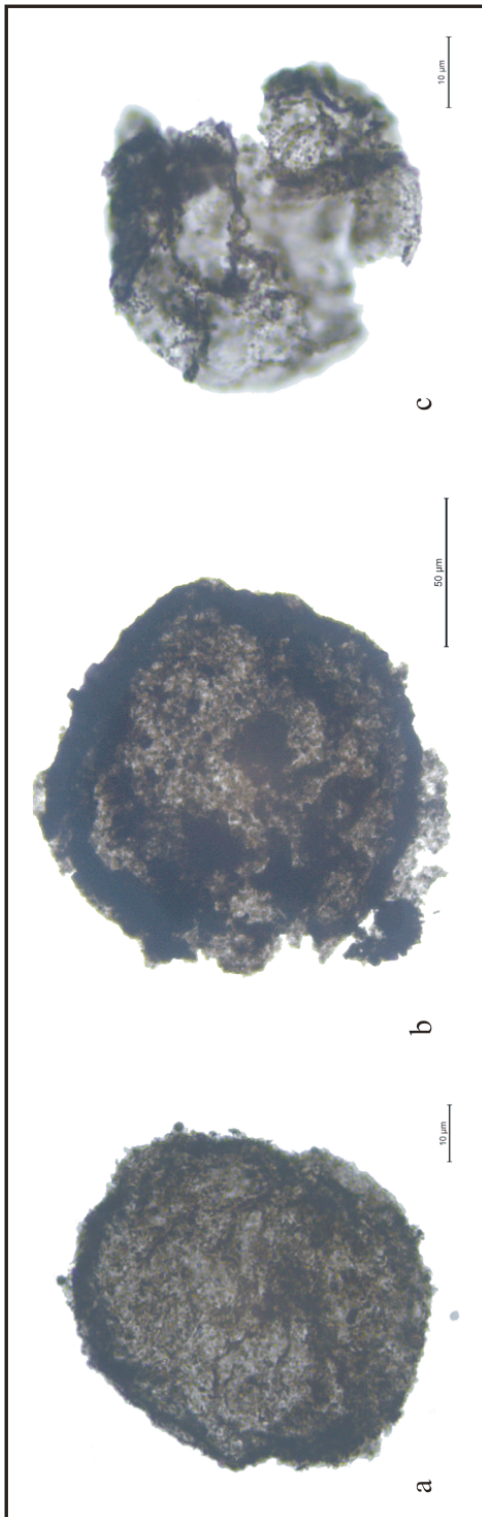


Fig.4. a- *Leiosphaeridia minutissima* Naumova (1949), specimen Arat 29A-5, b- *Leiosphaeridia jacutica* (Timofeev, 1966), specimen ARAT 29E-8, c- *Lophosphaeridium* sp, specimen 110227/2B-2.

We apply here the criteria established by Jankauskas et al. (1989) for the classification of leiospherids . This taxon occurs as a subordinate component of the microbiota of Frecheirinha Formation.

Leiosphaeridia jacutica (Timofeev, 1966) emend. Mikhaylova and Jankauskas in
Jankauskas et al., 1989

Fig. 4b

1989 *Leiosphaeridia jacutica* Maikhayloav and Jankauskas: fig 3a,b,7,9
1994 *Leiosphaeridia jacutica* Butterfield et al.: fig. 16H

Material. Four carbonized specimens in palynological macerations, Araticum Section (sample ARAT 29).

Description. Several thick-walled, spheroidal vesicles, characterized by a rough surface, concentric folds and diameter roughly between 100 and 200 µm. Most specimens are opaque in transmitted light, and only a few are translucent (Fig. 4b).

Remarks. The thicker walls compared to *L.tenuissima* cause the opaqueness of the vesicles. The species is a common constituent of Neoproterozoic microbiotas worldwide.

Genus *Lophosphaeridium* Timofeev (1959), ex Downie (1963), emend. Lister (1970)

Lophosphaeridium sp.

Fig. 4c

Material. Poorly preserved and few specimens in palynological maceration 110227/2B-2 of carbonates in the Araticum Section. .

Description. Robust-walled vesicles with verrucate, plicated surface. Verrucae are less than 1 μm in diameter. Folds are prominent and the diameter of the only complete specimen observed is 46 μm . (Fig.4.c)

Remarks. These sphaeromorphs are left in open nomenclature because of the small number of specimens observed and poor preservation. Although we cannot totally rule out that these are degraded (corroded) *Leiosphaeridia* specimens, the regularity of the verrucae suggest that they are original structures and not taphonomic artifacts. The microfossils described under this taxon are similar to those reported by Gaucher et al. (2008) under *Lophosphaeridium* sp. for the Las Ventanas Formation (Uruguay).

Kingdom Eubacteria Woese & Fox (1977)
Phylum Cyanobacteria Stanier *et al.* (1978)
Classis, Ordo et Fam. indet.

Genus *Bavlinella* (Schepeleva) Vidal (1976)

Type species. *Bavlinella faveolata* (Schepeleva) Vidal (1976)

Bavlinella faveolata (Schepeleva) Vidal (1976)

Fig. 5

Type specimen. German *et al.* (1989) designated a lectotype for the species from the Kotlin Formation of the former USSR. This lectotype has been also illustrated by Schopf (1992: pl. 54-J). Therefore, the valid designation of a lectotype supersedes any previous restriction of the application of the name of the genus and species *Bavlinella faveolata*. *Sphaerocongregus variabilis* Moorman (1974) is thus to be considered as a junior synonym (Gaucher *et al.*, 2003).

Material. Seven specimens occur both in thin section ARAT 30 and palynological macerations (ARAT 20, 29C and 35B) of carbonates from the Frecheirinha Formation

Description. The observed specimens are mainly single spheroidal vesicles made up of tens of tightly-packed, micron-sized (1-2 μm) microspheres (Fig. 5.a), thus corresponding to the endosporangia morphotype of Moorman (1974). Two types of preservation were observed: carbonized remains, occurring in macerations, and hematized specimens (only in thin sections). Both types of preservation are common for the species (e.g. Gaucher, 2000; Gaucher *et al.*, 2003; Gaucher and Germs, 2006). Diameter of vesicles ranges between and 20 μm (mean= 15 μm , N= 8)

Remarks. *B. faveolata* is a subordinate component in the acritarch assemblage, which is clearly dominated by leiosphaerids.

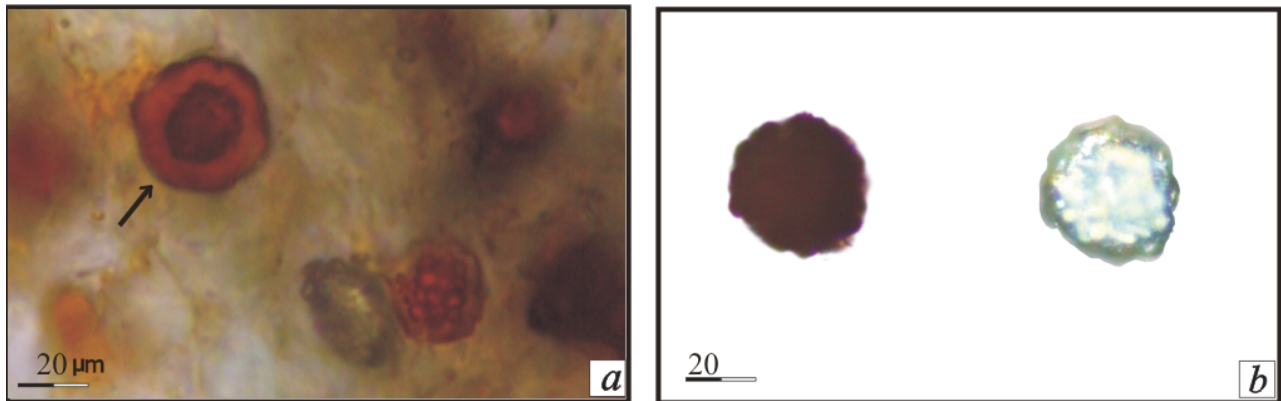


Fig.5. a-Thin section of limestone (Araticum section) showing hematized *Bavlinella faveolata* (Schepeleva) Vidal (1976), specimen ARAT 30 (arrowed), b- *Bavlinella faveolata* from a palynological maceration of black limestone, specimen ARAT 29C-8 in transmitted light. c-Same specimen as previous in combined reflected-transmitted light, showing individual microspheres.

5. Discussion

The evolution of acritarchs in the Ediacaran (ca 635-542Ma) can be divided in three phases (Gaucher & Sprechmann, 2009):

- (a) The Ediacaran Leiosphere Palynoflora (ELP; Grey 2005), re-named as Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora (EELP: Gaucher & Sprechmann, 2009), which is characterized by *Leiosphaeridia*-dominated assemblages, typically with large acritarchs >200 µm in diameter. *Bavlinella faveolata* is a subordinated component and acanthomorphs are absent. This

assemblage occurs in successions deposited after the end-Cryogenian glacial event (635Ma), and before the Gaskiers glacial event at ca. 580 Ma (Liu et al., 2013).

(b) The Ediacaran Complex Acanthomorph Palynoflora (ECAP: Grey et al., 2003; Grey, 2005) best represented in China and Australia, and made up of a diverse assemblage of spiny acritarchs (acanthomorphs). It has been recently divided in a lower *Tianzhushania spinosa*-assemblage, only represented in the lower Doushantuo Formation, and an upper, more widespread *Tanarium anozos-Tanarium conoideum* assemblage (Liu et al., 2013).

(c) The Late Ediacaran Leiosphere Palynoflora (LELP; Gaucher and Sprechmann, 2009) marks a late Ediacaran crisis, represented by a low-diversity assemblage, characterized mainly by *Leiosphaeridia* sp, abundant *Bavlinella faveolata*, colonial microfossils of the genus *Soldadophycus* (ci) and small acanthomorphs of the genus *Asteridium*. Soft-bodied and skeletal metazoans co-occur with the depauperate acritarch assemblage. This assemblage spans the period between ca. 560 Ma and the Neoproterozoic-Cambrian boundary at 541 Ma (Gaucher and Sprechmann, 2009).

The low diversity fossil assemblage of the Frecheirinha Formation comprises *Leiosphaeridia*, *Lophosphaeridium* and subordinated *Bavlinella faveolata*. Both *Leiosphaeridia* and *Bavlinella* are long-ranging microfossils, but occur as an assemblage in the early and latest Ediacaran successions worldwide (e.g. Germs et al., 1986; Gaucher et al., 2003, 2008; Gaucher and Germs, 2006; Grey et al., 2003). Morphologically complex acritarchs with a diversity of processes, appear for the first time in the Neoproterozoic (Huntley et al., 2006), but these do not occur in the Frecheirinha Formation.

The abundance of *Leiosphaeridia* sp, less abundance of *Bavlinella*, absence of ECAP acritarchs and the soft-bodied metazoans reported from the overlying Jaibaras Group, suggest an assignment of our fossil material to the Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora assemblage (EELP), and a depositional age for the Frecheirinha Formation between ca. 635 and 580 Ma. This acritach assemblage represents the initial recovery of the marine biota after the extreme climatic conditions that prevailed during the end-Cryogenian glacial event (ca. 635Ma). The absence so far in the Ubajara Group of clear glacial deposits and sedimentary features typical of post-glacial cap carbonates (Hoffman and Schrag, 2002) do not allow us to relate the Frecheirinha Formation to any glacial event. Chemostratigraphic studies of the carbonates (Sial et al., 2003; Chiglino et al., submitted), reported negative $\delta^{13}\text{C}$ values (-3.5 ‰) at the base of the unit that may be related to periods of low plankton bioproductivity or sea level fluctuations (Gaucher et al., 2004; Frei et al., 2011). The dark gray to black, laminated limestones of the Araticum section, start with a negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion (-3 ‰), followed by positive values up to +3 for the rest of the unit. The samples analyzed in this study come from the interval with positive $\delta^{13}\text{C}$ values.

According to Hyde et al (2000), Runnegar (2000) and Moczydlowska (2008), the “slushball Earth model” would better explain the evolution of acritarchs before, during and after the extreme Neoproterozoic glacial events. This model describes the presence of a circum-equatorial zone of open waters, where plankton could survive in the ice-free open waters or continental shelves. More studies are required to determine if the lower Frecheirinha Formation was deposited during one of these glacial events, despite the fact that sedimentological evidence of such an event is so far lacking. Alternatively, it could have been deposited between ice ages where no glacial rocks are to be expected.

6. Conclusions

The low-diversity microflora comprising *Leiosphaeridia*, *Lophospheridium* and subordinated *Bavlinella*, found in carbonates of the Frecheirinha Formation, is here assigned to the Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora (EELP), and suggests a depositional age between 635 and 580 Ma. These are the first Precambrian acritarchs so far reported from northeastern Brazil. Their thermal alteration index (TAI) between 4+ and 5, suggests metamorphic temperatures exceeding 200-250 °C, which are probably related to intruding granitic plutons.

A negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion, occurring below the fossil-bearing carbonates, lacks associated glacial deposits. If this negative excursion is related to the end-Cryogenian glacial event it may provide evidence supporting the non-global nature of ice cover (“slushball Earth hypothesis”). Thus, carbonates of Frecherinha Formation are potentially important for the understanding of Ediacaran biogeochemical evolution.

7. Acknowledgements

This study was partially supported by grants to ANS (CNPq 470399/2008, CNPq 472842/2010-2, and FACEPE APQ 0727-1.07/08).

8. References

- BEURLIN, K., SOMMER, F.W. 1957. Observações estratigráficas e paleontológicas sobre o calcário Corumbá. Boletim Divisão Geologia e Mineralogia/ DNPM 168, 1-47.
- BUTTERFIELD, N.J., KNOLL, A.H., SWETT, K., 1994. Paleobiology of the Neoproterozoic Svanbergfjellet Formation, Spitsbergen. Fossils & Strata, 34, 1-84.

CABY, R., SIAL, A.N., ARTHAUD, M.H., VAUCHEZ, A., 1991. Crustal evolution and the Brasiliano orogeny, northeast Brazil. In Dallmeyer, R.D., Lécorché, J.P. (Eds), The West African orogens and circum-Atlantic correlative. Springer-Verlag, pp. 373-397.

COSTA, J. M.; DE FRANÇA, J.B.; CAVALCANTE LINS, C.A.; BACCHIEGGA, I.F.; HABEKOST, C.R.; BARBOSA DA CRUZ, W. 1979. Geologia da Bacia Jibaras Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. Ministerio das Minas e Energias. Departamento Nacional Da produção Mineral. Série Geologia N°14, Seção Geologia Básica N°11, p. 106.

DOWNIE, C., SARJEANT, W.A.S. 1963. On the interpretation of some hystrichosphere genera. *Palaeontology*, 6, 83- 96.

EISENACK, A., 1958. TASMANITES NEWTON 1875. und Leiosphaeridia n.g. als Gattungen der Hystrichosphaeridia.- *Paleontographica*, Abteilung A, 110, 1- 19.

FREI, R., GAUCHER, C., DØSSING, L.N., SIAL, A.N. 2011. Chromium isotopes in carbonates a tracer for climate change and for reconstructing the redox state of ancient seawater. *Earth and Planetary Science Letters* 236, 28–40.

FRIMMEL, H.E. 2010. On the reliability of stable carbon isotopes for Neoproterozoic chemostratigraphic correlation. *Precambrian Research* 182: 239-253.

GAUCHER, C., SPRECHMANN, P., MONTAÑA, J. 1998. New advances on the geology and paleontology of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado Group of the Nico Pérez Terrane of Uruguay. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte*, 1998 (2), 106- 118.

GAUCHER, C., 2000. Sedimentology, palaeontology and stratigraphy of the Arroyo del Soldado Group(Vendian to Cambrian, Uruguay). *Beringeria*, 26, 1-120.

GAUCHER, C., BOGGIANI, P.C., SPRECHMANN, P., SIAL, A.N., FAIRCHILD, T.2003. Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumba Groups

(Uruguay and Brazil) palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications. *Precambrian Research* 120, 241–278.

GAUCHER, C., GERMS, G.J.B. 2003. Preliminary biostratigraphic correlation of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay) with the Congo Caves and Nama groups (South Africa and Namibia). *Revista Sociedad Uruguaya Geología*, 3, Publicación Especial 1, 141-160.

GAUCHER, C., SIAL, A.N., BLANCO, G., SPRECHMANN, P. 2004. Chemostratigraphy of the Lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and Paleoclimatic Implications. *Gondwana Research*, 7:715-730.

GAUCHER, C., CHIGLINO, L., PECOITS, E. 2004C. Southernmost exposures of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay): palaeogeographic implications for the amalgamation of W-Gondwana. *Gondwana Research*, 7 (3), 701-714.

GAUCHER, C., FRIMMEL, H.E., GERMS, G.J.B. 2005A. Organic-walled microfossils and biostratigraphy of the upper Port Nolloth Group (Namibia): implications for the latest Neoproterozoic glaciations. *Geological Magazine*, 142 (5), 1-21.

GAUCHER, C., GERMS, G.J.B. 2006. Recent advances in South African Neoproterozoic-Early Palaeozoic biostratigraphy: correlation of the Congo Caves and Gamtoos Groups, and acritarchs of the Sardinia Bay Formation, Saldania Belt. *South African Journal of Geology*, 109: 193-214.

GAUCHER, C., BLANCO, G., CHIGLINO, L., POIRÉ, D.G., GERMS, G.J.B. 2008. Acritarchs of Las Ventanas Formation (Ediacaran, Uruguay): implications for the timing of coeval rifting and glacial events in western Gondwana. *Gondwana Research*, 13: 488-501

GAUCHER, C., SPRECHMANN, P. 2009. Neoproterozoic acritarch evolution. Neoproterozoic-Cambrian biota. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): *Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, 16, Elsevier, pp. 319-326.

GERMS, G.J.B., KNOLL, A.H. AND VIDAL, G. 1986. Latest Proterozoic microfossils from the Nama Group, Namibia (South West Africa). *Precambrian Research*, 32, 45-62.

GOMES BARROS, F, SALES VIANA, M.S., AGOSTINHO, O.M.S., LIMA FILHO, F.M., 2012. Primeira Ocorrência da Fauna Ediacara No Nordeste Do Brasil. En: I Simpósio Brasileiro de Paleoinvertebrados. UNESP. São Paulo, Brasil.

GREY, K., WALTER, M. R., AND CALVER, C. R. 2003. Neoproterozoic biotic diversification: Snowball Earth or aftermath of the Acraman impact. *Geology* 31: 459–462.

GREY, K. 2005. Ediacaran palynology of Australia. *Memoir of the Association of Australasian Palaeontologists* 31, 1–439.

Halverson, G.P., Wade, B.P., Hurteng, M.T., Barovich, K.M. 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. *Precambrian Research* 182: 337-350.

HOFMANN, H.J., JACKSON, G.D. 1996. Notes on the geology and micropaleontology of the Proterozoic Thule Group, Ellesmere Island, Canada, and north-west Greenland.-Geological Survey of Canada, Bulletin, 495

HOFFMAN, P. F., AND SCHRAG, D. P. 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change, *Terra Nova* 14: 129–155.1-26.

HUNTLEY, J.W., XIAO, S., KOWALEWSKI, M. 2006. 1.3 billion years of acritarch history: an empirical morphospace approach. *Precambrian Research* 144, 52–68.

HYDE, W.T., CROWLEY, T.J., BAUM, S.K., PELTIER, W.R. 2000. Neoproterozoic “snow- ball Earth” simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature* 405, 425–429.

JACOBSEN, S.B., KAUFMAN, A.J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 37-57.

JANKAUSKAS, T.V., MIKHAILOVA, N.S., HERMANN, T.N.1989. Mikrofossilii Dokembriya SSSR. [Precambrian Microfossils of the USSR] Nauka, Leningrad.

KAUFMAN, A. J. AND KNOLL, A. H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater. *Precambrian Research* 73: 27–49.

LIU, P., YIN, C., CHEN, S., TANG, F., GAO, L.2013. The biostratigraphic succession of acanthomorphic acritarchs of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China and its biostratigraphic correlation with Australia. *Precambrian Research*, 225, 29– 43

MELEZHIK, V.A., GOROKOV, I.M., KUZNESTOV, A.B., FALLICK, A.E., 2001. Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonates: implication for “blind dating. *Terra Nova* 13:1-11.

MOORMAN, M. 1974. Microbiota of the late Proterozoic Hector Formation, southwestern Alberta, Canada. *Journal of Paleontology*, 48, 524-539.

MOCZYDŁOWSKA, M., 2008.The Ediacaran microbiota and the survival of Snowball Earth conditions.*Precambrian Research* 167 (2008) 1–15.

MOCZYDŁOWSKA, M. AND KONSTANTIN E. N., 2012. Ediacaran radiation of organic-walled microbiota recorded in the Ura Formation, Patom Uplift, East Siberia. *Precambrian Research* 198–199:1–24.

NARBONNE, G. M., 2005. The Ediacara Biota : Neoproterozoic Origin of Animals and Their Ecosystems. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33:421–42

NAUMOVA, S.N., 1949. Spory nizhnego kambriya. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Geologicheskaya*, 49-56.

LISTER, T.R., 1970. The acritarchs and chitinozoa from the Wenlock and Ludlow Series of the Ludlow and Millichope areas, Shropshire. *Palaeontographical Society Monograph*, 124, 1-100.

LIU, P., YIN., C., CHEN, S., TANG, F., GAO, L. The biostratigraphic succession of acanthomorphic acritarchs of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China and its

biostratigraphic correlation with Australia. *Precambrian Research*, 225, 29-43.

PFLUG, H.D., REITZ, E. 1992. Palynostratigraphy in Phanerozoic and Precambrian Metamorphic Rocks.-In: Schidlowski, M., Golubic, S., Kimberley, M.M., McKirdy, D.M., Trudinger, P.A. (Eds.), *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Springer, Berlin, 509-518.

RUNNEGAR, B., 2000. Loophole for Snowball Earth. *Nature* 405, 403–404

SANTOS, S.T.J., FETTER, A.H., HACKSPACHER, P.C., VAN SCHUMS, W.R., NOGUEIRA NETO J.A. 2008. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. *Journal of South America Science* 25: 271-284.

SERGEEV, V.N., KNOLL, A.H., VOROBIEVA, N.G. 2011. Ediacaran microfossils from the Ura Formation, Baikal-Patom Uplift, Siberia: taxonomy and biostratigraphic significance. *Journal of Paleontology* 85, 987–1011

SIAL, A.N., FERREIRA, V.P., ALMEIDA, A.R. AND MOURA, C.V.A. 2003. C-, O- and Sr-isotope composition and age of the carbonates of the Frecheirinha Formation, NW Ceará, Northeastern Brazil. IX Congresso Brasileiro de Geoquímica. Belém -Pará. Resumos Expandidos, 410-411.

TAHATA, M., UENO, Y., ISHIKAWA, T., SAWAKI, Y., MURAKAMI, K., HAN, J., SHU, D., LI, Y., GUO, J., YOSHIDA, N., KOMIYA, T., 2012. Carbon and oxygen isotope chemostratigraphies of the Yangtze platform, South China: Decoding temperature and environmental changes through the Ediacaran. *Gondwana Research*, 23, 333-353.

TEICHMÜLLER, M., LITCKE, R., ROBERT, P. 1998. Coalification and maturation. In: Taylor, G.H., Teichmüller, M., Davis, A., Diessel, C.F.K., Littke, R., Robert, P. (Editors), *Organic Petrology*, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 86-174.

TIMOFEEV, B.V., 1959. *Drevnejshaya flora Pribaltiki*. Trudy VNIGRI 129, Leningrad, 320 pp.

VIDAL, G. 1976. Late Precambrian microfossils from the Visingsö Beds in southern Sweden. *Fossils and Strata*, 9, 1-57.

WARREN, L.V., PACHECO, M.L.A.F., FAIRCHILD, T.R., SIMÕES, M.G., RICCOMINI, C., BOGGIANI, P.C., CÁCERES, A.A. 2012. The dawn of animal skeletogenesis: Ultrastructural analysis of the Ediacaran metazoan *Corumbella weneri*: *Geology*, 40, 691–694.

WILLMAN, S., MOCZYDLOWSKA, M. & GREY, K. 2006. Neoproterozoic (Ediacaran) diversification of acritarchs – a new record from the Murnaroo 1 drillcore, eastern Officer Basin, Australia. *Review of Palaeobotany and Palynology* 139, 17–39. DOI 10.1016/j.revpalbo.2005.07.014

XIAO, S.H. 2004. New multicellular algal fossils and acritarchs in Doushantuo chert nodules (Neoproterozoic, Yangtze Gorges, South China). *Journal of Paleontology* 78, 393–40

Zaine, M.F., Fairchild, T.R., 1985. Comparison of *Aulophycus luciano* Beurlen & Sommer from Ladário (MS) and the genus *Cloudina* Germs, Ediacaran of Namibia. *Anais Academia Brasileira de Ciências* 57, 130.

ZANG, W.L. & WALTER, M.R. 1992. Late Proterozoic and Early Cambrian microfossils and biostratigraphy, Amadeus Basin, central Australia. *Memoris of Association of Australasian Palaeontologists* 12, 1–132.

CAPITULO V

Carbonatos Ediacaranos da Formação Frecherinha (Grupo Ubajara), Domínio Médio Coreaú - Província Borborema : implicações paleogeográficas e paleoclimáticas.

Leticia Chiglino

NEG-LABISE, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

Resumo

A Província Borborema, localizada no nordeste do Brasil, foi formada em sua maior parte, durante a orogenia Brasiliana - Pan Africana (700 e 500 Ma), pela convergência dos crátons São Luis - Oeste Africano e São Francisco. Simultaneamente aos eventos tectônicos, drásticas mudanças climáticas, aconteceram durante o Neoproterozóico, com importantes consequências na evolução dos organismos e na química dos oceanos. A glaciação Cryogeniana Inferior ou Marinoana, tem lugar em torno de 635 Ma. No Brasil, as capas carbonáticas relacionadas a esse evento, são representadas pelos carbonatos da Formação Marissol d'Oeste no Cinturão Paraguai, Formação Sete Lagoas no cinturão Brasília, e na Província Borborema, no Domínio Setentrional, pelos mármore Ediacaranos da Formação Jucurutu, Grupo Seridó. No Domínio Meio Coreaú, os carbonatos da Formação Frecheirinha de idade Ediacarana, apresentam valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ -3 ‰, sem depósitos glaciais associados, são repostados para esta unidade, os primeiros acritarcos pré-cambrianos, até agora relatados para o nordeste do Brasil.

Pelo arcabouço tectônico dos continentes, durante o Ediacarano, essas sequências carbonáticas, possivelmente, estão associadas ao mesmo oceano de águas frias Pharusian-Goías, em margens continentais diferentes. Se a excursão negativa de $\delta^{13}\text{C}$ da Formação Frecherinha, não está relacionada ao evento glacial, no final Criogeniano, pode fornecer evidências que suportaram a natureza não-global de cobertura de gelo ("hipótese slushball Terra").

Palavras-chave: Ediacarano, Província Borborema, Glaciação Cryogeniana, capas carbonáticas,

1-Introdução

O Neoproterozóico (1000-540Ma) tornou-se importante para estudar e entender a evolução tectônica, do clima e da vida na Terra. Durante esse período, entre 1000-750 Ma, o supercontinente Rodínia fragmenta-se, aproximadamente aos 600 Ma inicia um novo processo de fusão dos blocos continentais, que irão formar o continente Gondwana. Os processos de fragmentação e fusão, vão se desenvolver de forma diacrônica nas diferentes placas, de acordo com a tectônica local (Brito Neves, et al.,2003).

A Província Borborema (Almeida, 1981), que compreende parte do nordeste do Brasil, foi formada principalmente durante a orogênia Brasileira - Pan Africana (700 e 500 Ma; Brito Neves & Cordani, 1991), pela convergência dos cratons São Luis - Oeste Africano e São Francisco. A subdivisão da província em sectores e domínios, com base em sua evolução tectônica e estratigráfica, é proposta por vários autores como Jardim de Sá & Hachspacher,(1980); Santos & Brito Neves (1984), Caby *et al.* (1991), Van Schmus et al. (1995a,b) entre outros. Brito Neves et al. (2000), a dividiu em quatro domínios, separados entre si por lineamentos e zonas de cisalhamento de escala continental: (a) Domínio Médio Coreaú, entre o Lineamento Transbrasiliano (NE) e o Cráton São Luis-África (NW); (b) Domínio Setentrional, posicionado entre os Lineamentos Transbrasiliano (NE-SW) e Patos (W-E); (c) Domínio Transversal situado entre os lineamentos Patos e Pernambuco (EW) na parte central da província; (d)Domínio do Sul, ao sul do Lineamento Pernambuco (Fig.1)

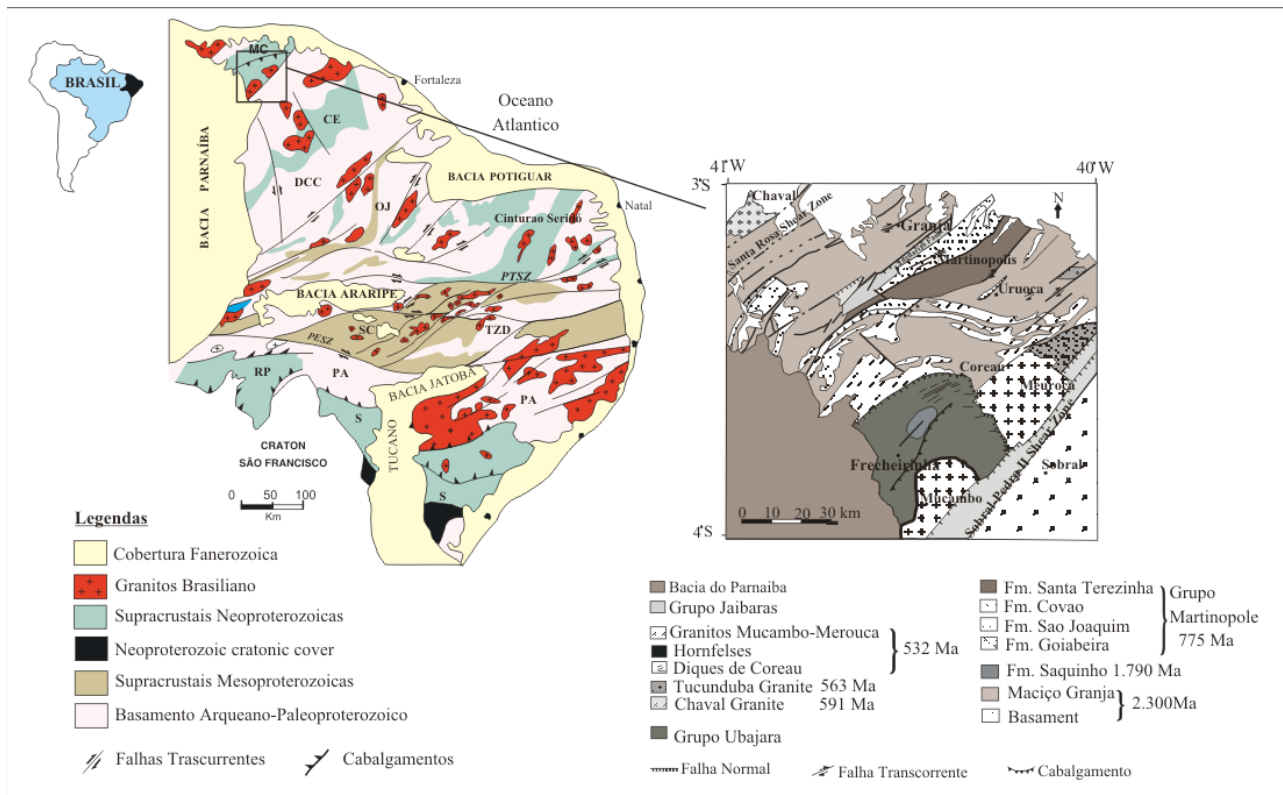


Figura1. Esquema simplificado da Província Borborema e geologia do Domínio Meio Coreau. (Modificado de Santos et al., 2008).

Contemporâneo aos eventos tectônicos, drásticas mudanças climáticas aconteceram durante o Neoproterozoico, com importantes consequências na evolução dos organismos e na química dos oceanos. Três eventos glaciais são registrados durante esse período; no Criogeniano Inferior (710Ma), no Criogeniano Superior (635Ma) e final do Ediacarano (540 Ma) (Halverson, 2011).

Os registros associados às glaciações Neoproterozóicas se caracterizam pela presença de capas carbonáticas, sobrepostas a rochas de origem glacial, que evidenciam a passagem abrupta de clima frio para tropical e, em alguns casos, presença de formações de ferro bandeadas (BIFs).

As capas carbonáticas, apresentam características sedimentológicas e geoquímicas particulares, que permitem diferenciá-las. As flutuação abruptas entre valores negativos e positivos de $\delta^{13}\text{C}$, vem sendo usada como ferramenta importante, para determinar e correlacionar, esses eventos glaciais. Estudos estratigráficos, sedimentológicos, paleomagnéticos e geoquímicos desses registros, sugerem que as glaciações Criogenianas são de escala global, no contexto da hipóteses de “*Snowball Earth*” (Hofmann et al., 1998, Hofmann e Scharg, 2002). A extensão da glaciação Gaskeriana, ainda é discutida, se corresponde a um evento global, ou se assemelha as que ocorreram durante o Fanerozóico. .

Na Província Borborema, no Domínio Setentrional, o Grupo Seridó apresenta valores negativos de $\delta^{53}\text{Cr}$ nos BIFs, associados as valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, dos mármores da Formação Jucurutu, considerados como uma capa carbonática, depositada após à glaciação Marinoana. A idade proposta para a Formação Jucurutu é Ediacarana, em torno de 630-610 Ma. (Campos, 2011). No Domínio Meio Coreauí, os carbonatos da Formação Frecheirinha, também de idade Ediacarana (Chiglino et al.,a. submetido), apresentam valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, sem depósitos glaciais associados.

Essas duas sequências carbonáticas, com idades similares e ambientes de deposição aparentemente diferentes, tornam-se importantes para estudar a evolução tectônica da Província Borborema e os eventos glaciais durante o Neoproterozóico.

2. Contexto geológico da área de estudo.

2.1 Domínio Meio Coreaú

Localiza-se no estado do Ceará, no setor noroeste da Província Borborema, limita-se na sua porção norte com o cratón São Luís, a oeste com a Bacia paleozóica do Parnaíba e, o sul, com o Domínio Ceará Central, pelo Lineamento Transbrasilano, que representa uma mega zona de cisalhamento, que se estende desde o nordeste da África Ocidental, até a região central do Brasil (Fig.1). O arcabouço geológico do Domínio Meio Coreaú é caracterizado por unidades que vão desde o Paleoproterozóico até o Cambriano, representadas por: (a) Maciço Granja de idade paleoproterozóica (Brito Neves, 1983); (b) Formação Saquinho que representa uma sequência vulcano-sedimentar, com idade U–Pb 1790Ma, em zircões de metariolites intercaladas (Santos, 1999); (c) Grupo Martinópolis constituído principalmente por quartzitos, micaxistos, paragnaisses, mármore e metavulcânicas, com metamorfismo fácies xisto verde e fácies anfibolito, com idade de 777 ± 11 Ma, determinada nas rochas vulcânicas intercaladas (Fetter et al., 2003); (d) Grupo Jaibaras, sequência vulcano-sedimentar de idade Ediacarana-Cambriana, caracterizada pela presença de fauna Ediacarana (566-560 Ma), na Formação Pacujá (Oliveira, 2000; Barroso Gomes, et al., 2011). Uma importante atividade magmática relacionada com a orogenia Brasileira, tem seu registro na Província Borborema. No Domínio Meio Coreaú está representada pelos diques de Coreaú, os granitos Chaval, Tucunduba, Meruoca, Mucambo e a Suíte vulcânica Parapuí.

O arcabouço tectônico regional caracteriza-se por falhas transcorrentes, de empurrão e zonas de cisalhamento de grande escala, com direção E- W para NE-SW, geradas principalmente durante a orogenia Brasileira entre 622 e 532Ma (Santos et al., 2008).

2.2. Formação Frecheirinha, Grupo Ubajara

O Grupo Ubajara representa uma sequência de plataforma marinha raso, conformada de base ao topo pelos arenitos da Formação Trapiá, pelitas avermelhadas da Formação Caiçaras, que contém até 60% de FeO na matriz, calcários cinza e margas subordinadas da Formação Frecheirinha, e no topo, por arenitos e grauvacas da Formação Coreaú. O Grupo Ubajara encontra-se em contatos tectônicos com as outras unidades do entorno, recortado pelos diques de Coreaú (560 Ma, Sial and Long, 1981) e intrudido pelo pluton Meuroca (540 Ma; Sial, 1989)

A Formação Frecheirinha, se apresentam como faixas irregulares, com direção NE-SE, no em torno da cidade de Frecheirinha. A maior espessura com 300 metros encontra-se na área da concessão da empresa Votorantim S.A, antiga Companhia Cearense de Cimento Portland. A formação é constituída por calcários finos, de colorações preta e cinza escuro, laminados e intercalados na base, com níveis de margas e, para o topo, observa-se a presença de laminação biogênica. Analises geoquímicos determinam valores de CaO entre 57 e 10 wt % , entre 0.04 e 2.4 w% de MgO, e alto teor de Sr, que alcança até 3399 ppm, o que estariam indicando, uma possível mineralogia original de composição aragônítica. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ caracterizam-se por valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -3 ‰ na base e positivos no topo, com valores máximos de 3.7 ‰ PDB (Fig.2.A). A relação de $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$, determinada em sessões do meio para o topo da unidade, tem valores entre 0.7075 e 0.7085 (Fig.3).

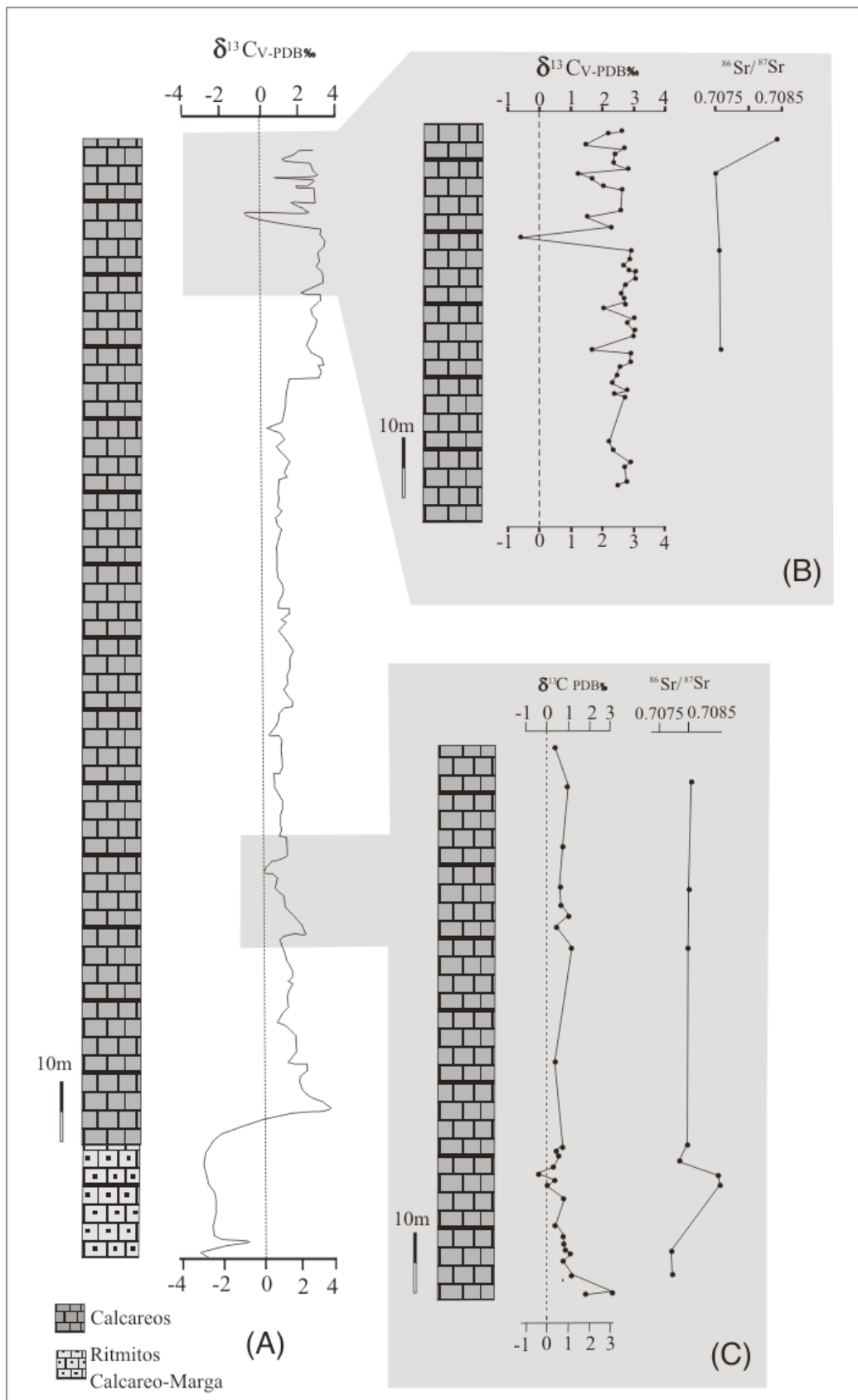


Figura.2. Curvas de $\delta^{13}\text{C}$ e $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ da Formação Frecherinha: (A) Perfil composto; (B) Perfil Companhia Cearense de Cimento Portland (Sial, 2000); (C) Perfil Angustura.

Pela primeira vez Chiglino et al.,b (submetido), reporta a ocorrência de microfósseis de parede orgânica, como os primeiros acritarcos pré-cambrianos, até agora identificados, no nordeste do Brasil. Apresentam baixa diversidade, com predominância de *Leiosphaeridia* e *Bavlinella* subordinada.

A idade Formação Frecheirinha tem sido inferida como Neoproterozóica, em função de que, são recortados pelos Diques de Coreaú de 560 Ma, intrudidos pelo granito de Meuroca de 540 Ma e, sobrepostos pelo Grupo Jaibaras de idade Edicarano-Cambriano 566-520 Ma (Oliveira, 2000; Barroso Gomes, et al.,2012). A partir dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -3 e 3.7 ‰ V-PDB, e a relação $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ entre 0.7075 e 0.7085, comparados com as curvas globais de Sr e $\delta^{13}\text{C}$; e a assembléia de palinomorfos encontrados, como parte da *Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora assemblage (EELP)* (Gaucher & Sprechmann, 2009), considera-se como Ediacaranos entre 635-580 Ma (Jacobsen & Kaufman, 1999, Halverson, 2011). Segundo Santos et al., (2011) o metamorfismo de fácies anfíbolita do Grupo Martinópolis, e, xisto verde do Grupo Ubajara, são consequências da primeira fase de deformação, durante o início da orôgenia Brasileira, aproximadamente aos 620 Ma, que determinou a colisão continental, resultando no desenvolvimento do Lineamento Transbrasiliiano. Portanto, a idade sugerida de deposição da Formação Frecheirinha, seria entre 635 e 620 Ma.

3-Discussão e Conclusões

A ruptura do supercontinente Rodinia, teve como consequência, a abertura e fechamento de diversos oceanos, durante os períodos Meso e Neoproterozóico. Criou-se uma região entre os crátons Congo- São Francisco-Amazônia e do Oeste Africano, compostos de bacias, oceanos locais e, um oceano maior, conhecido como Farusian, entre o extremo norte do cráton do Oeste Africano e

Amazônico. O oceano Farusian formou-se aproximadamente aos 800 Ma após a ruptura ao longo da margem leste do cráton do Oeste Africano. A extensão sul desse oceano, corresponde ao oceano Goiás, situado no SW entre o Cráton Amazônico e Cráton do Congo (Brito Neves, et al.,1999). Durante o processo de fusão até a formação do Gondwana-Oeste entre 635-600 Ma, esses oceanos começaram a se fechar. A porção sul do Lineamento Transbrasiliano, marca a zona de sutura do encerramento do oceano Goiás e, do lado africano, o Cinturão Trans-Saharan, para o oceano Farusian, conformando a zona de mega cisalhamento Transbrasiliano-Kandi .

Contemporâneo com esses eventos tectônicos, tem lugar a última glaciação durante o Cryogeniano (635Ma). As capas carbonáticas, relacionadas com esse evento no Brasil, estão representadas por:

(a) Ao longo da margem sul do Cratôn Amazônico, norte do Cinturão Paraguai, pelos carbonatos da Formação Marissol d'Oeste, na base do Grupo Araras (Nogueira, 2003; Alvarenga et al, 2008), e depositados sobre as diamictitas da Formação Puga 706 ± 9 Ma (Babinski, et al., 2013). Os carbonatos apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$, entre -10 e -1.7 ‰ V-PDB nas dolomitas, entre -5.4 e 1‰ V-PDB nos calcários laminados e valores de $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ entre 0.7040 e 0.7080 (Alvarenga et al., 2008).

(b) No Cráton São Francisco, no Cinturão Brasília, a Formação Sete Lagoas, base do Grupo Bambuí , sobreposto a rochas glaciais da Formação Jequitaiá. Reportam-se valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -1 e + 5 ‰ V-PDB e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0.7074 e 0,7078. A idade máxima de sedimentação do Grupo Bambuí é estimada em 610 Ma, conforme isócronas U/P extraídas de zircões detríticos provenientes de diferentes níveis de terrígenos associados à Formação Sete Lagoas e a Formação Serra de Santa Helena (Lima,2012)

(c) Na Província Borborema, no Domínio Setentrional, pelos níveis carbonatos da Formação Jucurutu, definidos para o Grupo Seridó (Fig.4). Apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -7 e +10 ‰ V-PDB, e $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 0.7074, e teriam sido depositados entre 620 Ma e 595 Ma (Campos, 2011). Formações Ferríferas Bandadas, encontram-se intercaladas com os carbonatos.

Grupo Ubajara não tem depósitos glaciais ou BIF'S, associados e, a Formação Frecheirinha não tem características sedimentológicas das capas carbonáticas pós-glaciais (Hoffman and Schrag, 2002). Os valores $\delta^{13}\text{C}$ negativos (-3 ‰) na base dos carbonatos, possivelmente estão relacionados á períodos de baixa bioprodutividade do plâncton ou, flutuações do nível do mar (Gaucher et al, 2004; Frei et al 2011).

A falta de evidencias de um evento glacial no Grupo Ubajara, a diferencia das outras unidades mencionadas, podem ser explicada segundo Chiglino, et al.b (submetido) pela teoria de “slushball Earth” (Hyde et al, 2000; Runnegar,2000 ; Moczydlowska, 2008). Nesse caso a Terra não estaria completamente coberta por gelo no final do Cryogeniano, e existiriam zonas de águas abertas perto do equador e plataformas livres de gelo.

Pela idade determinada para os carbonatos da Formação Frecheirinha (635-620 Ma), deve ser contemporâneos, com as diferentes unidades acima descritas. O Lineamento Transbrasiliano, que marca o limite entre o Domínio Meio Coreau e o Domínio Setentrional, representa á sutura do oceanos Fharusian-Goiás, durante a primeira fase da orogênia Brasileira. . Dados geofísicos e geológicos, determinam uma zona de sutura, aparentemente oceânica, abaixo da cobertura sedimentar da Bacia de Parnaíba, que continua, até o sudoeste do Cinturão Brasília, o que sugere, que ambos oceanos estavam interligados no final do Neoproterozoico (Fetter, et al., 2003; Santos,

et al., 2011) (Fig.3). Pelo arcabouço tectônico, proposto para o final do Cryogeniano- Ediacarano, a deposição dessas sequências carbonáticas, possivelmente estejam relacionadas ao mesmo oceano de águas frias, o Fharusian-Goiás (Fig.3).

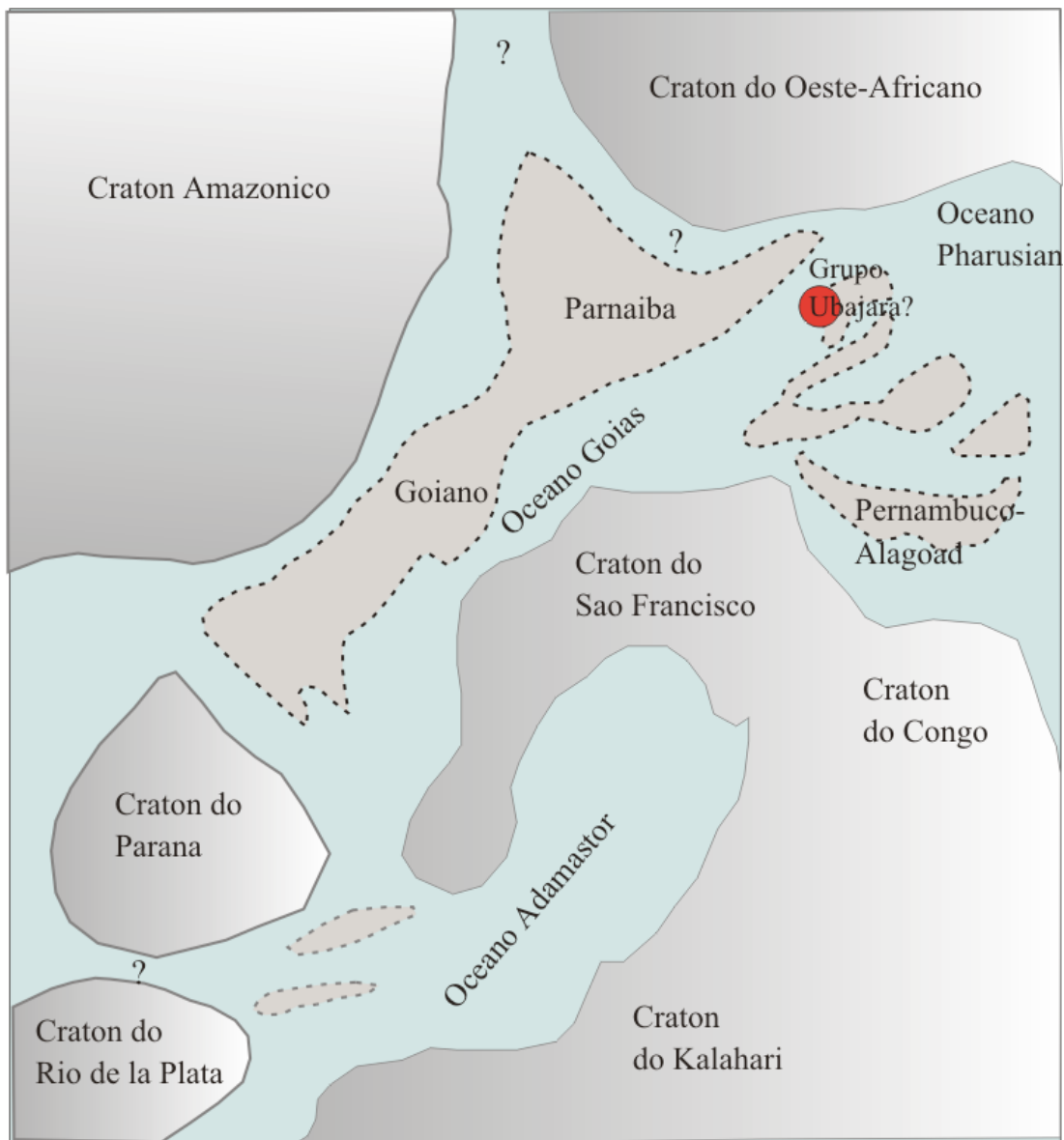


Figura 3 . Distribuição dos oceanos e blocos continentais no Ediacarano. (Modificado de Hasui, 2010).

Na Província Borborema, a evidência da existência de um domínio oceânico, antes da fusão do Gondwana Ocidental, está dada pelo Batolito de Santa Quintera, no Domínio Setentrional. Com idades U-Pb entre 665 e 622, representa as raízes de um arco continental, devido a que junto com os granitos e dioritas que conforma suite, encontra-se sedimentos característicos de bacias de antepaís e retroarco, típicos de ambientes de subducção (Fetter, et al., 2003). Dados de Sm-Nd do Grupo Ubajara , reportam uma ampla gama de idades T_{DM} entre 2,87 Ga a 1,62 Ga, principalmente entorno de 2,4 Ga, indicando que a principal fonte dos sedimentos, vem das rochas embasamento do Domínio Médio Coreau (Santos et al., 2002, Santos et al., 2011).

Pode-se concluir de forma preliminar, que os carbonatos Ediacaranos da Formação Frecheirinha e Jucurutu, representados na Província Borborema, foram depositadas nas margens continentais, de blocos crustais diferentes, e em ambientes diferentes associados possivelmente às águas do mesmo oceano Pharusian -Goiás.

Portanto, a Formação Frecheirinha, torna-se fundamental para a reconstrução paleogeográfica e a evolução dos organismos, entre a ruptura de Rodinia e a formação do continente Gondwana. Como também para entendimento dos eventos glaciais durante o Neoproterozóico

4- Referências

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews* 17: 1-29.

Alvarenga, C.J.S, Dardenne, M.A., Santos, V.R. Brod, R.E., Simone. M.C.L, Sial, N.A., Dantas, E.L., Ferreira, P.V.2008. Isotope stratigraphy of Neoproterozoic cap carbonates in the Araras Group, Brazil.Gondwana Research 13 (2008) 469–479.

Babinski, M., Boggiani, P.C., Trindade, R.I.F, Fanning, C.M. 2013.Detrital zircon ages and geochronological constraints on the Neoproterozoic Puga diamictites and associated BIFs in the southern Paraguay Belt, Brazil.Gondwana Research 23 (2013) 988–997.

Barroso Gomez,F.,Sales Viana, M.S.,Agostinho,O.M.S., Lima Filho,F.M., 2012. Primeira Ocorrência da Fauna Ediacara No Nordeste Do Brasil. En: I Simpósio Brasileiro de Paleoinvertebrados. UNESP. São Paulo, Brasil

Brito Neves, B.B., 1983. O mapa geológico do nordeste oriental do Brasil, Escala 1;1.000.000. Thesis, Livre docência, Universidade de São Paulo, p. 177.

Brito Neves, B. B. & Cordani, U. G., 1991. Tectonic Evolution of South America During the Late Proterozoic, In: Crustal Evolution in the Late Proterozoic (edited by Stern, R. J. & Van Schmus, W. R.) Precambrian Research, 53: 23-40

Brito Neves B.B. De, Santos E.J. & Van Schmus W.R.. 2000. Tectonic history of the Borborema Province northeastern Brazil. In: Cordani U.G, Milani E.J., Thomaz Filho A & Campos D.A (Eds.). Tectonic Evolution of South America. International Geological Congress, 31:151-182.

Brito Neves, B.B., Campos Neto, C.M., Fuck, R.A. 2003. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. Episodes, Vol 22, no.3

Caby, R., Sial, A. N., Arthaud, M.H., Vauchez, A. 1991. Crustal evolution and the Brasiliano orogeny in Northeast Brazil. In: Gallmeyer, R. D. Lécorché, J. P. (Eds.), The West African orogens and circum-atlantic correlative, Springer, Berlin, 373-397.

Campos, M. 2011. Químioestratigrafia de carbono e estrôncio e geoquímica de elementos terras raras em formações carbonáticas e ferreíferas do Cinturão Seridó, Nordeste do Brasil. Dissertação. Programa de Pós- Graduação em Geociências. UFPE. pp 84.

Chglino, L., Sial, N.A., Gaucher, C., Ferreira, P.V., Pimentel, M. C-isotope chemostratigraphy of the Ediacaran Frecheirinha Formation, Ubajara Group Northeastern, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* (Sometido)

Frei, R., Gaucher, C., Stolper, D., Canfield, D.E., 2013. Fluctuations in late Neoproterozoic atmospheric oxidation- Cr isotope chemostratigraphy and iron speciation of the late Ediacaran lower Arroyo del Soldado Group (Uruguay). *Gondwana Research* 23: 797–811

Fetter, A.H., dos Santos, T.J.S., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., Brito Neves, B.B., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., Wernick, E., 2003. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santana Quinteira batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implication for assembly of West Gondwana. *Gondwana Research* 6: 265-273.

Gaucher, C., Sial, A.N., Blanco, G., Sprechmann, P. 2004. Chemostratigraphy of the Lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and Paleoclimatic Implications. *Gondwana Research*, 7:715-730.

Gaucher, C., Sprechmann, P. 2009. Neoproterozoic acritarch evolution. Neoproterozoic-Cambrian biota. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): *Neoproterozoic- Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, 16, Elsevier, pp. 319-326.

Halverson, G.P. and Shields-Zhou, G., 2011. Chemostratigraphy and the Neoproterozoic glaciations. In: Arnaud, E., Halverson, G.P. & Shields- Zhou, G. (eds) *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. Geological Society, London, *Memoirs* 36: 51-66.

Hasui, Y. 2010. A grande colisão Pré- Cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 29, n. 2, p. 141-169.

Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., and Schrag, D. P., 1998. A Neoproterozoic snowball Earth, *Science* 281: 1342–1346.

Hoffman, P. F., and Schrag, D. P., 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change, *Terra Nova* 14: 129–155.

Hyde, W.T., Crowley, T.J., Baum, S.K., Peltier, W.R. 2000. Neoproterozoic “snow- ball Earth” simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature* 405, 425–429.

Jacobsen, S.B., Kaufman, A.J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 37-57.

Jardim De Sá & Hachspacher, P.C. 1980. Reconhecimento estrutural na borda noroeste do Cráton de São Francisco. Atas 31º Congresso Brasileiro de Geologia, 05: 2719-2731

Lima, O.N.B. 2012. Estratigrafia isotopica e evolucao sedimentar do Grupo Bambui na borda ocidental do Craton do Sao Francisco: implicacao tectonica e paleo-ambiental. Tese (doutorado)—Universidade Brasília, Instituto de Geociências, 2011.

Moczydlowska, M., 2008. The Ediacaran microbiota and the survival of Snowball Earth conditions. *Precambrian Research* 167 (2008) 1–15.

Nogueira, A.C.R., Riccomini, C., Sial, A.N., Moura, C.A.V., Fairchild, T.R., 2003. Soft-sediment deformation at the base of the Neoproterozoic Puga cap carbonate (southwestern Amazon craton, Brazil): confirmation of rapid icehouse to greenhouse transition in snowball Earth. *Geology* 31, 613–616.

Oliveira, D.C. 2000. Stratigraphic interplays between igneous and sedimentary events in the early Paleozoic Jaibaras Trough (Northeast Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*. 30(3). 427-431.

Santos, E. J. & Brito Neves, B. B. 1984. A Província Borborema. In: Almeida, F. F. M. & Hasui, Y.O. *Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher. p. 15-20.

Runnegar, B., 2000. Loophole for Snowball Earth. *Nature* 405, 403–404

Santos, T.J.S. 1999. Evolução Tectônica e Geocronológica do Extremo Noroeste da Província Borborema. PhD unpublished thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas IGCE/UNESP-Rio Claro, São Paulo, 186p.

Santos, T. J. S., Souza, G. M., Queiroz, H. B., Nogueira Neto, J. A. & Parente, C. V. 2002. Tafrogênese estateriana embasamento paleoproterozoico do NW da Província Borborema: Uma abordagem petrográfica, geoquímica e geocronológica In: Congresso Brasileiro de Geologia 41, João Pessoa, Actas. Sociedade Brasileira de Geologia, 337.

Santos, T.J.S, Fetter, A.H., Neto, J.A.N. 2011. Comparasion between the northwestern Borborema Province, NE Brazil, and the southwestern Pan-African Dahomey Belt, SW Central Africa. In:

Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B & De Wit, M.J. (eds) West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South American Region. Geological Society, London, Special Publication, 294, 101-119.

Sial, A.N., 1989. Petrologia, geoquímica de elementos maiores, traços, terras raras e isótopos (Sr, O, H, S) nos batólitos da Meruoca e Mocambo, Ceará, Nordeste do Brasil. Tese de Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 284p.

Sial, A.N., Long, L.E., Figueiredo, M.H., 1981. Rare Earth element geochemistry of the Meruoca and Mocambo plutons, Ceará, North-east Brazil. *Chemical Geology* 31, 271–283.

Van Schmus, W.R.; Brito Neves, B.B.; Hackspacher, P.C.; Babinski, M.; Fetter, A.; Dantas, E. 1995b. Neoproterozoic and late Mesoproterozoic sedimentary and volcanic sequences in the Borborema Province, NE Brazil. *Atas 16º Simp. Geol. Nordeste*, 2: 391-393.

CAPITULO VI

VI. CONCLUSÕES

1- A Formação Frecheirinha é constituída por calcários finos, de colorações preta e cinza escuro, laminados e intercalados na base, com níveis de margas e, para o topo, observa-se a presença de estromatolitos do tipo LLH.

2- A falta de registros glaciais no Grupo Ubajara podem ser explicadas por: (a) o grupo foi depositado durante o período interglacial, (b) a Terra não estaria completamente coberta de gelo durante o final do Cryogeniano e, a teoria de “slushball Earth” (Hyde et al, 2000; Runnegar, 2000; Moczydlowska, 2008) seria a mais adequada, na qual é definida uma zona circum- equatorial de águas abertas, ou, plataformas continentais livres de gelo, que permitiria a sobrevivência da vida.

3- A idade da Formação Frecheirinha é limitada pelos seguintes dados:

- (1) Valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0.7075 e 0.7080
- (2) Valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ na base de -3.5 ‰, passando para uma excursão positiva com valor máximo de +3.7 ‰ em direção ao topo.
- (3) assembléia acritarcas presentes, faz parte da chamada “*Early Ediacaran Leiosphere Palynoflora (EELP)*”
- (4) Diques básicos que cortam a unidade de idades Rb-Sr de $560 \pm 19\text{Ma}$
- (5) Macrofósseis de corpo mole da Fauna Ediacara, que podem ser atribuídos á assembléia do “*White Sea*”(Narbonne, 2005), presentes no Grupo Jaibaras, sobrejacente ao Grupo Uabjara.

4- Por primeira vez é relatada a presença de acritarcas na Formação Frecherinha e para o nordeste do Brasil.

5-Os carbonatos da Formação Frecherinha, são potencialmente importantes para entender a evolução bioquímica dos oceanos durante o Ediacarano.

6- De forma preliminar, conclui-se que a Formação Frecheirinha e Jucurutu, foram depositadas às margens continentais, de blocos crustais diferentes, associadas possivelmente às águas do oceanos Farusian -Goiás.

7- A Formação Frecheirinha, torna-se fundamental para a reconstrução paleogeográfica e a evolução dos organismos, entre a ruptura de Rodinia e a formação do continente Gondwana.

O arranjo tectônico das diferentes unidades, que conformam o Domínio Médio Coreau, é produto de eventos ocorridos entre 1790 e 532 Ma, o qual se reflete em uma estrutura tectônica complexa, que requer maiores estudos estruturais, em detalhes, para possibilitar uma melhor correlação com outras unidades da América do Sul e da África.

VII. REFERÊNCIAS

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews* 17: 1-29.

Bowring, S., Myrow, P., Landing, E., Ramezani, J. and Grotzinger, J. (2003) Geochronological constraints on terminal Neoproterozoic events and the rise of metazoans. *Geophys. Res. Abstr.*, 5, 219.

Brasier, M.D. & Shields, G., 2000. Neoproterozoic chemostratigraphy and correlation of the Port Askaig glaciation, Dalradian Supergroup of Scotland. *Journal of the Geological Society, London* **157**, 909-914.

Brito Neves, B.B., 1983. Regionalização geotectônica do pré-Cambriano nordestino. Thesis, Universidade de São Paulo, p.198.

Brito Neves B.B., De, Santos E.J. & Van Schmus W.R.. 2000. Tectonic history of the Borborema Province northeastern Brazil. In: Cordani U.G, Milani E.J., Thomaz Filho A & Campos D.A (Eds.). *Tectonic Evolution of South America*. International Geological Congress, 31:151-182.

Canfield, D.E., Poulton, S.W., Knoll, A.H., Narbonne, G.M., Ross, G., Goldberg, T., Strauss, H., 2008. Ferruginous Conditions Dominated Later Neoproterozoic Deep-Water Chemistry. *Science* 321: 949-952.

Condon, D., Zhu, M., Borwring, S., Wang, W., Yang, A., Jin, Y., 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science* 308: 95-98

136Costa, J. M., De França, J.B., Cavalcante Lins, C.A., Bacchiegga, I.F., Habekost, C.R.; Barbosa da Cruz, W., 1979. Geologia da Bacia Jibaras Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. Ministerio das Minas e Energias. Departamento Nacional Da produção Mineral. Série Geologia Nº14, Seção Geologia Básica Nº11, p. 106.

Gaucher, C., Sial, A.N., Blanco, G., Sprechmann, P. 2004. Chemostratigraphy of the Lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and Paleoclimatic Implications. *Gondwana Research*, 7:715-730.

Gaucher, C., Sprechmann, P. 2009. Neoproterozoic acritarch evolution. Neoproterozoic-Cambrian biota. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds): Neoproterozoic- Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Developments in Precambrian Geology*, 16, Elsevier, pp. 319-326.

Hackspacher, P.C., Soares, J.S., Petta, R.A. 1987. Geologia do Grupo Ubajara, região de Frecheirinha (CE). In: CONGR. BRAS. aGEOL., 35. Belém, 1988. Anais... Belém, SBG. v. 6, p. 2661-2677.

Halverson, G.P. and Shields-Zhou, G., 2011. Chemostratigraphy and the Neoproterozoic glaciations. In: Arnaud, E., Halverson, G.P. & Shields- Zho, G. (eds) The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Geological Society, London, Memoirs 36: 51-66.

Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., and Schrag, D. P., 1998. A Neoproterozoic snowball Earth, *Science* 281: 1342–1346.

Hoffman, P. F., and Schrag, D. P., 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change, *Terra Nova* 14: 129–155.

Hoffmann, K.-H., Condon, D.J., Bowring, S.A., & Crowley, J.L., 2004. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: constraints on Marinoan glaciation. *Geology* 32, 817-820.

Hyde, W.T., Crowley, T.J., Baum, S.K., Peltier, W.R., 2000. Neoproterozoic “snow- ball Earth” simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature* 405, 425–429.

Jacobsen, S.B., Kaufman, A.J., 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology* 161: 37-57.

Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B. and Knoll, A.H., 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleocimate. *Earth Planetary Science Letters* 120: 409 - 430.

Kaufman, A. J. and Knoll, A. H., 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater. *Precambrian Research* 73: 27–49.

Kirschvink, J.L. (1992) Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth. In: *The Proterozoic Biosphere, A Multidisciplinary Study* (Eds J.W. Schopf and C. Klein), 1st edn, pp. 51–52. Cambridge University Press, New York.

Kirschvink, J.L., 2002. Quand tous les océans étaient gelés (When all of the oceans were frozen). *La Recherche* 355, 26-30.

Knoll, A. H., 2000. Learning to tell Neoproterozoic time. *Precambrian Research* 100: 3–20.

Knoll, A., Walter, M., Narbonne, G., Christiebllick, N., 2006. The Ediacaran Period: a new addition to the geologic time scale. *Lethaia* 39: 13-30.

Lima, O.N.B. 2012. Estratigrafia isotopica e evolucao sedimentar do Grupo Bambui na borda ocidental do Craton do Sao Francisco: implicacao tectonica e paleo-ambiental. Tese (doutorado)—Universidade Brasília, Instituto de Geociências, 2011.

Melezhik, V.A., Gorokov, I.M., Kuznestov, A.B., Fallick, A.E., 2001. Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonates: implication for “blind dating. *Terra Nova* 13: 1-11.

Moczyłowska, M. 2008. The Ediacaran microbiota and the survival of Snowball Earth conditions. *Precambrian Research* 167 (2008) 1–15.

Oliveira, D.C.2000. Revaluation of the tectono-magmatic evolution of the Jaibaras Trough (northeast Brazil). *Acta Geologica Hispanica* , v. 36 , no 1-2, p. 53-95

Runnegar, B. 2000. Loophole for Snowball Earth. *Nature* 405, 403–404

Santos, S.T.J., Fetter, A.H., Hackspacher, P.C., Van Schums, W.R., Nogueira Neto J.A., 2008. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. *Journal of South America Science* 25: 271-284.

Sial, A.N., Ferreira, V.P., Almeida, A.R., Romano, A.W., Parente, C.V., Costa, M.L. and Santos., V.H., 2000. Carbon isotope fluctuations in Precambrian carbonate sequences of several localities in Brazil. *Anais da Academia Bras. de Ciências*, vol. 72 (4), 539-558.

Sial, A.N.,Ferreira, V.P.,Almeida, A.R. and Moura, C.V.A., 2003. C-, O- and Sr-isotope composition and age of the carbonates of the Frecheirinha Formation, NW Ceará, Northeastern Brazil,IX Congresso Brasileiro de Geoquímica. Belém -Pará. Resumos Expandidos, 410-411.

APÊNDICE

Table 1. C and O isotope analyses, major and trace chemistry. Oxides in wight % and trace elements in ppm.

Sample	Height*	$\delta^{13}\text{C} \text{‰}$ V-PDB	$\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ V-PDB	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Rb	Sr	Mg/Ca	Mn/Sr
(a) Angustura Farm section												
ANG 1	0	0.08	-14.29	51.6	0.96	3.4	0.3	0.02	5	2853	0.02	0.01
ANG 2	5	0.84	-12.10									
ANG 3	20	0.73	-11.72									
ANG 4	25	0.54	-16.48	49.5	1.7	6.2	1.0	0.1	10	431	0.03	0.12
ANG 5	30	0.58	-13.59									
ANG 6	38	1.8	-9.71	51.8	2.0	3.3	0.4	0.03	5	1372	0.16	0.02
ANG 7	40	3.11	-7.1									
ANG 8	41	1.14	-9.71	46.8	2.1	7.2	2.5	0.03	27	1299	0.04	0.02
ANG 9	43	0.74	-11.71									
ANG 10	45	1.06	-11.39									
ANG 11	46	0.85	-11.09									
ANG 12	47	0.76	-11.80									
ANG 13	48	0.76	-11.86									
ANG 14	49	0.35	-11.87									
ANG 15	51	0.76	-14.03									
ANG 16	55	0	-12.43	50.1	2.2	4.5	0.42	0.05	11	992	0.04	0.04
ANG 17	57	0.35	-14.11									
ANG 18	58	-0.42	-12.44	49.4	1.6	5.1	3.7	0.04	7	850	0.032	0.01
ANG 19	59	0.27	-12.94									
ANG 20	61	0.52	-13.16									
ANG 21	62	0.41	-12.47									
ANG 22	64	0.55	-12.35	49.7	1.3	4.1	3.4	0.03	8	1162	0.026	0.02
ANG 23	68	0.71	-12.34									
ANG 24	70	0.34	-12.00	51.2	1.5	3.542	0.5	0.07	8	952	0.02	0.06
ANG 25	72	1.12	-11.48									
ANG 26	74	0.41	-12.47	52.2	1.4	2.4	0.4	0.05	10	1062	0.02	1,2
ANG 27	76	1	-12.54									
ANG 28	82	0.64	-13.01	49.7	2.1	4.0	0.7	31	19	1317	0.3	0.02
ANG 29	84	0.61	-13.28									
ANG 30	88	0.73	-12.86									
ANG 31	90	0.93	-11.72									
ANG 32	93	0.37	-13.27									
(b) Araticum section												
ARAT 1	0	-0.07	-10.38									
ARAT 2	1	-2.63	-9.15	56.2	0.7	1.56	0.14	0.01	1	809	0.01	0.01
ARAT 3	2	-0.43	-10.82	53.5	0.8	4.67	0.4	0.02	3	1385	0.01	0.01
ARAT 4	3	0.05	-10.88									
ARAT 5	6	0.46	-9.818	45.9	2.1	7.2	3.4	0.02	2	1870	0.04	0.01
ARAT 6	8	0.12	-9.77	47.2	2.2	1.1	3.4	0.02	3	2405	0.06	0.01
ARAT 7	10	0.16	-10.03									
ARAT 8	11	0.22	-9.37									

ARAT 9	12	-0.19	-9.86	50.3	1.3	8.1	1.3	0.02	1	986	0.02	0.01
ARAT10	13.4	0.03	-9.45									
ARAT11	14.4	-0.44	-7.39	43.6	92	24	5	0.04	41	807	0.10	0,04
ARAT12	16.4	-0.79	-9.58	43.6	4.2	12.4	1.3	0.03	6	917	0.01	0.02
ARAT13	17	-0.63	-9.94									
ARAT14	18	-0.15	-7.16									
ARAT15	18.5	-0.25	-10.05									
ARAT16	20	0.08	-8.44									
ARAT17	21	0.12	-8.43	44.4	3.5	5.4	3.5	0.02	8	1413	0.03	0.01
ARAT18	23	0.17	-8.17	54.1	1.7	2.4	0.4	0.01	3	1722	0.10	0.00
ARAT21	26	-0.36	-9.71	52.4	1.8	4.6	0.4	0.01	4	1971	0.02	0.00
ARAT25	28	-0.21	-9.80	48.0	1.9	8.03	1.6	0.02	12	3445	0.03	0.00
ARAT26	31	0.3	-9.72	47.3	1.6	8.7	1.9	0.02	18	3399	0.03	0.01
(c) Companhia Cearense de Cimento Portland Poty section (Mine Frecheirinha)												
MF 1	0	-0.82	-11.83	25.1	0.14	37.7	1.1	0.14	33	365	0.2	0.29
MF 2	2	-0.75	-12.09									
MF 3	4	-0.36	-9.32	12.7	9.1	40.1	8.1	0.14	124	112	0.6	0.96
MF 4	6	-0.39	-9.79									
MF 5	8	-0.21	-8.71	19.2	12.52	28.4	4.4	0.15	65	168	0.55	0.69
MF 6	10	-0.22	-9.10									
MF 7	12	-0.11	-9.42	10.4	8.3	47.1	8.1	0.11	137	110	0.67	0.77
MF 8	14	-0.39	-9.65									
MF 9	17	0.00	-13.11	3.4	3.6	30.5	5.2	0.08	43	283	0.1	0.21
MF 10	19	0.39	-14.19									
MF 11	21	-0.1	-13.44	23.5	5.7	30.1	9.6	0.12	82	231	0.2	0.4
MF 12	22	-0.04	-14.49									
MF 13	23	-0.13	-13.49	29.4	5.8	31.9	1.6	0.08	26	318	0.16	0.19
MF 14	25	-0.12	-15.25									
MF 15	27	0.16	-16.18	31.7	3.3	17.6	11.3	0.04	110	318	0.08	0.05
MF 16	30	0.00	-15.44									
MF 17	33	0.24	-14.95	38.9	3.281	18.766	2.837	0.04	18	402	0.07	0.01
MF 18	35	0.1	-14.75									
MF 19	37	0.24	-14.95	41.8	3.5	13.7	2.3	0.03	9	565	0.07	0.06
MF 20	39	0.1	-16.62									
MF 21	41	0.49	-12.51	18.8	6.5	39.4	7.6	0.08	98	343	0.29	0.18
MF 23	45	1.04	-14.2	49.6	1.5	5.1	1.0	0.05	9	1247	0.03	0.03
MF 24	47	0.88	-13.19									
MF-25	49	1.11	-13.41									
MF 26	51	0.69	-12.99									
MF 27	53	0.99	-14.32	48.2	1.8	6.8	0.9	0.02	9	1562	0.03	0.001
MF 28	55	1.33	-8.36									
MF 29	57	1.01	-12.45	49.1	1.8	4.8	1.2	0.03	496.5	11	1145	0.03
MF 30	59	0.88	-12.83									
MF 31	61	1.2	-10.7	49.4	1.4	4.3	1.5	0.02	335.7	11	1145	0.24
MF 32	63	0.99	-10.16									

MF 38	75	0.89	-11.5									
MF 39	77	1.19	-10.88									
MF 40	79	0.29	-11.53									
MF 41	81	0.64	-11.27									
MF 42	83	0.82	-13.92									
MF 43	85	0.88	-11.91									
MF 44	87	0.28	-11.77									
(d) Road Aroeira-Ibaúna section												
PE 1/15	32	2.95	-11.03									
PE 1/17	47	2.42	-15.88									
PE 1/19	87	1.35	-10.85									
PE 1/21	108	1.19	-12.10									
PE 1/23	120	0.78	-14.30									
Sample	Height*	$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ V-PDB	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ V-PDB	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Rb	Sr	Mg/Ca	Mn/Sr
(a) Angustura Farm section												
ANG 1	0	0.08	-14.29	51.6	0.96	3.4	0.3	0.02	5	2853	0.02	0.01
ANG 2	5	0.84	-12.10									
ANG 3	20	0.73	-11.72									
ANG 4	25	0.54	-16.48	49.5	1.7	6.2	1.0	0.1	10	431	0.03	0.12
ANG 5	30	0.58	-13.59									
ANG 6	38	1.8	-9.71	51.8	2.0	3.3	0.4	0.03	5	1372	0.16	0.02
ANG 7	40	3.11	-7.1									
ANG 8	41	1.14	-9.71	46.8	2.1	7.2	2.5	0.03	27	1299	0.04	0.02
ANG 9	43	0.74	-11.71									
ANG 10	45	1.06	-11.39									
ANG 11	46	0.85	-11.09									
ANG 12	47	0.76	-11.80									
ANG 13	48	0.76	-11.86									
ANG 14	49	0.35	-11.87									
ANG 15	51	0.76	-14.03									
ANG 16	55	0	-12.43	50.1	2.2	4.5	0.42	0.05	11	992	0.04	0.04
ANG 17	57	0.35	-14.11									
ANG 18	58	-0.42	-12.44	49.4	1.6	5.1	3.7	0.04	7	850	0.032	0.01
ANG 19	59	0.27	-12.94									
ANG 20	61	0.52	-13.16									
ANG 26	62	0.41	-12.47									
ANG 27	64	0.55	-12.35	49.7	1.3	4.1	3.4	0.03	8	1162	0.026	0.02
ANG 228	68	0.71	-12.34									
ANG 29	70	0.34	-12.00	51.2	1.5	3.542	0.5	0.07	8	952	0.02	0.06
ANG 30	72	1.12	-11.48									
ANG 31	74	0.41	-12.47	52.2	1.4	2.4	0.4	0.05	10	1062	0.02	1,2
ANG 32	76	1	-12.54									

(b) Araticum section												
ARAT 1	0	-0.07	-10.38									
ARAT 2	1	-2.63	-9.15	56.2	0.7	1.56	0.14	0.01	1	809	0.01	0.01
ARAT 3	2	-0.43	-10.82	53.5	0.8	4.67	0.4	0.02	3	1385	0.01	0.01
ARAT 4	3	0.05	-10.88									
ARAT 5	6	0.46	-9.818	45.9	2.1	7.2	3.4	0.02	2	1870	0.04	0.01
ARAT 6	8	0.12	-9.77	47.2	2.2	1.1	3.4	0.02	3	2405	0.06	0.01
ARAT 7	10	0.16	-10.03									
ARAT 8	11	0.22	-9.37									
ARAT 9	12	-0.19	-9.86	50.3	1.3	8.1	1.3	0.02	1	986	0.02	0.01
ARAT10	13.4	0.03	-9.45									
ARAT11	14.4	-0.44	-7.39	43.6	92	24	5	0.04	41	807	0.10	0,04
ARAT12	16.4	-0.79	-9.58	43.6	4.2	12.4	1.3	0.03	6	917	0.01	0.02
ARAT13	17	-0.63	-9.94									
ARAT14	18	-0.15	-7.16									
ARAT15	18.5	-0.25	-10.05									
ARAT16	20	0.08	-8.44									
ARAT17	21	0.12	-8.43	44.4	3.5	5.4	3.5	0.02	8	1413	0.03	0.01
ARAT18	23	0.17	-8.17	54.1	1.7	2.4	0.4	0.01	3	1722	0.10	0.00
ARAT21	26	-0.36	-9.71	52.4	1.8	4.6	0.4	0.01	4	1971	0.02	0.00
ARAT25	28	-0.21	-9.80	48.0	1.9	8.03	1.6	0.02	12	3445	0.03	0.00
ARAT26	31	0.3	-9.72	47.3	1.6	8.7	1.9	0.02	18	3399	0.03	0.01
(c) Companhia Cearense de Cimento Portland Poty section (Mine Frecheirinha)												
MF 1	0	-0.82	-11.83	25.1	0.14	37.7	1.1	0.14	33	365	0.2	0.29
MF 2	2	-0.75	-12.09									
MF 3	4	-0.36	-9.32	12.7	9.1	40.1	8.1	0.14	124	112	0.6	0.96
MF 4	6	-0.39	-9.79									
MF 5	8	-0.21	-8.71	19.2	12.52	28.4	4.4	0.15	65	168	0.55	0.69
MF 6	10	-0.22	-9.10									
MF 7	12	-0.11	-9.42	10.4	8.3	47.1	8.1	0.11	137	110	0.67	0.77
MF 8	14	-0.39	-9.65									
MF 9	17	0.00	-13.11	3.4	3.6	30.5	5.2	0.08	43	283	0.1	0.21
MF 10	19	0.39	-14.19									
MF 11	21	-0.1	-13.44	23.5	5.7	30.1	9.6	0.12	82	231	0.2	0.4
MF 12	22	-0.04	-14.49									
MF 13	23	-0.13	-13.49	29.4	5.8	31.9	1.6	0.08	26	318	0.16	0.19
MF 14	25	-0.12	-15.25									
MF 15	27	0.16	-16.18	31.7	3.3	17.6	11.3	0.04	110	318	0.08	0.05
MF 16	30	0.00	-15.44									
MF 17	33	0.24	-14.95	38.9	3.281	18.766	2.837	0.04	18	402	0.07	0.01
MF 18	35	0.1	-14.75									
MF 19	37	0.24	-14.95	41.8	3.5	13.7	2.3	0.03	9	565	0.07	0.06
MF 20	39	0.1	-16.62									
MF 21	41	0.49	-12.51	18.8	6.5	39.4	7.6	0.08	98	343	0.29	0.18
MF 23	45	1.04	-14.2	49.6	1.5	5.1	1.0	0.05	9	1247	0.03	0.03
MF 24	47	0.88	-13.19									

MF 28	55	1.33	-8.36									
MF 29	57	1.01	-12.45	49.1	1.8	4.8	1.2	0.03	496.5	11	1145	0.03
MF 30	59	0.88	-12.83									
MF 31	61	1.2	-10.7	49.4	1.4	4.3	1.5	0.02	335.7	11	1145	0.24
MF 32	63	0.99	-10.16									
MF 33	65	0.89	-10.77	41.3	2.0	12.3	4.3	0.024	699.4	49	1018	0.04
MF 34	67	1.14	-10.23									
MF 35	69	1.02	-9.77									
MF 36	71	1.16	-9.97									
MF 37	73	0.95	-10.02									
MF 38	75	0.89	-11.5									
MF 39	77	1.19	-10.88									
MF 40	79	0.29	-11.53									
MF 41	81	0.64	-11.27									
MF 42	83	0.82	-13.92									
MF 43	85	0.88	-11.91									
MF 44	87	0.28	-11.77									
(d) Road Aroeira-Ibaúna section												
PE 1/15	32	2.95	-11.03									
PE 1/17	47	2.42	-15.88									
PE 1/19	87	1.35	-10.85									
PE 1/21	108	1.19	-12.10									
PE 1/23	120	0.78	-14.30									