



QUIMIOESTRATIGRAFIA DE C, O E SR DOS CARBONATOS EDIACARIANOS DA FAIXA PARAGUAI, MATO GROSSO

Figueiredo M.F.¹, Babinski M.¹, Alvarenga C.J.S.², Pinho F.E.C.³ e Simon C.M.¹

1. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 05508-080, mimff@hotmail.com e babinski@usp.br

2. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 70910-900, alval@unb.br

3. Departamento de Recursos Minerais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, 78060-900, aguapei@yahoo.com

Palavras-chave: Grupo Araras, Formação Serra Azul, quimioestratigrafia, glaciações.

INTRODUÇÃO

A Era Neoproterozóica foi marcada por importantes mudanças climáticas que podem ter influenciado a Explosão Cambriana de vida, despertando o interesse de muitos pesquisadores. No entanto não há consenso sobre quantas glaciações ocorreram durante esta Era ou sobre a idade delas. Trabalhos recentes (Halverson *et al.*, 2004; Kendall *et al.*, 2004) sugerem três glaciações Neoproterozóicas: a mais antiga denominada Sturtiana-Raptiana (ca. 740 Ma), Marinoana (ca. 600 Ma) a segunda, e a mais jovem chamada Gaskiers ou Varanger (ca. 580 Ma).

É neste contexto que se depositou a Faixa Paraguai, na base da qual se encontra registrada a glaciação Marinoana nos sedimentos glaciomarinhos e glaciais do Gr. Cuiabá e das formações Puga e Bauxi (Nogueira *et al.*, 2003; Alvarenga *et al.*, 2004). Sobre estes, uma espessa seqüência de carbonatos plataformais do Gr. Araras (Almeida 1964, Alvarenga *et al.*, 2000), incluindo capa carbonática (Nogueira *et al.*, 2003; Alvarenga *et al.*, 2004). Depositada sobre esta seqüência carbonática, foram recentemente encontradas rochas glaciais capeadas por calcários, denominadas Formação Serra Azul (Figueiredo *et al.*, 2004; Figueiredo *et al.*, 2005; Alvarenga *et al.*, no prelo).

São as rochas carbonáticas do Gr. Araras e da Fm. Serra Azul o objeto de estudo quimioestratigráfico com os isótopos de C, O e Sr deste trabalho, evidenciando uma nova glaciação Neoproterozóica no limite com o Cambriano.

GEOLOGIA REGIONAL

A Faixa Paraguai está localizada na borda sudeste do Craton Amazônico, composta de rochas sedimentares depositadas numa margem continental passiva durante o Neoproterozóico, posteriormente dobradas pela orogenia Brasiliana-Pan Africana durante o Cambriano (Alvarenga e Trompette 1993; Trompette *et al.* 1994; Trindade *et al.*, 2003).

Na base da Faixa Paraguai encontra-se o Gr. Cuiabá formado, da base para o topo, de sedimentos compostos de folhelhos ricos em matéria orgânica e dolomitos, sobrepostos por sedimentos glaciomarinho e turbidítico, como diamictitos, conglomerados, arenitos e folhelhos (Alvarenga e Trompette, 1992; Alvarenga *et al.*, 2000). Esta seqüência grada lateralmente para a Formação Puga, composta principalmente de diamictitos depositados na área cratônica, de forma penecontemporânea àquela

durante a glaciação Marinoana (Nogueira *et al.*, 2003; Alvarenga *et al.*, 2004).

Estas rochas glacialmente influenciadas são cobertas por cerca de 1300m de carbonatos do Gr. Araras, dividido em duas formações. Na base tem-se a Fm. Guia composta de uns 250m de calcário e marga laminados. Acima desta está a Fm. Nobres com mais de 1100 m de dolomito de plataforma rasa (Almeida 1964; Alvarenga *et al.*, 2000).

Depositada sobre o Gr. Araras está a Fm. Serra Azul, composta por uns 70m de diamictito na base e cerca de 250m de laminito com alguns grânulos e seixos variegados no restante da seqüência, capeados por uns 12m de camadas calcáreas intercaladas no topo (Figueiredo *et al.*, 2004; Figueiredo *et al.*, 2005; Alvarenga *et al.*, no prelo).

A unidade superior da faixa consiste de rochas siliciclásticas do Gr. Alto Paraguai, dividido em duas formações geológicas: Fm. Raizama composta de conglomerados, arcóseos e arenitos; e Fm. Diamantino composta de folhelhos vermelhos, siltitos e arcóseos.

MÉTODOS UTILIZADOS

Foram coletadas sistematicamente cerca de 122 amostras de carbonatos não metamorfizados do Gr. Araras e Fm. Serra Azul, na região do Município de Nobres (figura), com intervalos variando entre 1,5 a 20m, de acordo com as condições de campo. Destas amostras foram escolhidas 51 para estudo petrográfico, onde se selecionou as porções inalteradas para *drilling* com broca diamantada de 1mm de diâmetro, excluindo aquelas que apresentaram qualquer indicio de alteração, como recristalização, dissolução, estilólitos, veios, microfalhas e componentes detriticos. Também análise química por Fluorescência de Raio-X para os elementos Si, Al, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Fe, Rb e Sr, que auxiliam na identificação de processos diagenéticos e dolomitização que podem influenciar nas razões isotópicas.

As análises isotópicas (C, O e Sr) foram realizadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. As análises dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio foram obtidas através da reação da amostra pulverizada com H₃PO₄ 100%, a 25°C por 24 horas (McCrea, 1950). O CO₂ liberado foi analisado no espectrômetro de massa Europa Geo20 do CPGeo. A precisão destas análises é de cerca de 0,2‰. As análises isotópicas de estrôncio foram obtidas através da reação dos carbonatos pulverizados com ácido acético 0,5M. O estrôncio foi separado dos demais elementos através da técnica de troca iônica, e



suas composições isotópicas determinadas no espectrômetro de massa VG-354. As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtidas no padrão NBS 987 neste equipamento apresentam um valor médio de 0.710240 ± 0.00008 .

SEÇÕES ESTUDADAS

Todas as seções litoestratigráficas estudadas constituem uma seqüência estratigráfica contínua de uns 1700m, estudadas separadamente pela dificuldade de exposição da seqüência completa. As camadas encontram-se subverticalizadas na região de Nobres.

FORMAÇÃO GUIA

Esta seção encontra-se a pouco mais de 600m a noroeste da Pedreira Copacel II. Neste local a Fm. Guia está sobreposta aos diamictitos, de matriz arenosa com clastos máficos e graníticos, da Fm. Puga. O contato basal com a mesma não pode ser observado, assim como os primeiros 20m basais, devido aos depósitos de talus. Embora sejam poucos os afloramentos expostos, pôde-se amostrar com intervalos irregulares de 2,5-20 m uma seqüência de aproximadamente 80m. É composta basicamente de calcário cinza, na maioria das vezes laminado, mas também apresentando estratificação *humucky* ou maciço com gretas de contração. São comuns estilólitos de pequena amplitude entre os planos de acamamento. Alguns níveis apresentam glóbulos de sílica cinza com calcário no seu interior.

INTERCALAÇÃO ENTRE DOLOMITOS E CALCÁRIOS

A seção foi detalhada na frente de lavra da Pedreira Copacel II, com amostragem de 4m, onde se observa uma intercalação persistente de calcário predominantemente laminado e lentes espessas de dolomito por quase 200m de espessura, provavelmente uma transição da Fm. Guia para a Fm. Nobres. Entre o topo da seção anterior e a base desta, há cerca de 50m encobertos pelo manto de alteração intempérica. Em direção ao topo têm-se camadas centimétricas de calcário cinza claro, com filmes de argila vermelha (apenas na base), alternadas com calcário laminado cinza escuro com filmes de matéria orgânica entre as lâminas e camadas. Seguem com intercalação de camadas decimétricas de brechas sedimentares de matriz clara e clastos arredondados e alongados de calcário escuro da camada sotoposta. Do meio da seção em direção ao topo, observa-se calcário laminado, porém alternando lâminas milimétricas escuras e claras ritmicamente. Em um nível de poucos centímetros, esse ritmo deposita-se de forma concordante sobre uma brecha de granulometria média, pouco desordenada (com laminação rítmica intensamente microfahada), possível sismo. Lentes de dolomito ocorrem intercaladas aos ritmicos ao longo da seção, possuindo 1,5-2m de espessura, com base reta e topo ondulado. Em alguns níveis centimétricos ocorrem nódulos de *chert* escuro.

FORMAÇÃO NOBRES

Esta seção inicia-se com perfil a cerca de 100 m a sudeste da pedreira Copacel II em direção à Serra "Vai quem quê", com amostragem variando de 10-20 m. Persiste pelos primeiros 240 m a mesma intercalação de calcário laminado rítmico intercalado a espessas lentes de dolomito e algumas camadas de brecha sedimentar semelhante à descritas acima. Na base é possível identificar laminae claras fortemente recristalizadas. Algumas das lentes são claramente de dolomito secundário, devido à sua porosidade, cristalinidade e presença de microdrusas, as vezes guardando a laminação original. Os 450 m restantes são de uma monótona sucessão de dolomitoses, com alguns intervalos, em direção ao topo, de: dolomito bastante recristalizado com microdrusas; dolomito parcialmente silicificado; presença de camadas de arcóseos cinza de granulometria média com feldspatos de 10 cm e arcóseo róseo de granulometria fina com feldspatos de 3-5 cm; níveis totalmente silicificados; dolomito róseo devido à grande quantidade de terrígenos presente; doloarenito próximo ao topo, às vezes repletos de nódulos de *chert*, outras vezes apresentando estratificação cruzada ou *humucky* gradando para uma laminação incipiente e maciço; intraclastos milimétricos e estromatólitos colunares ramificados no topo. No alto da Serra "Vai quem quê" esta seção faz contato erosivo com arenitos, com estratificação cruzada, da Fm. Raizama.

FORMAÇÃO SERRA AZUL

Esta seção constitui parte da Fm. Serra Azul e foi estudada na cava de argila da Indústria Cimento Itaú. Encontram-se expostos cerca de 80 m de laminito vermelho, sobreposto por 12 m de calcário seguido de uns 15 m de laminito cinza e intercalação de camadas de arenito no topo, gradando para Fm. Raizama. Os calcários foram amostrados com intervalos irregulares de 1,2-4 m, apresentando várias estruturas, em direção ao topo: maciço, algumas camadas com gradação crescente, estratificação cruzada, *humucky*, filme de argila vermelha entre algumas camadas e laminação.

QUIMIOESTRATIGRAFIA

Segue-se uma breve descrição dos valores obtidos em cada seção litoestratigráfica analisada (Fig.1).

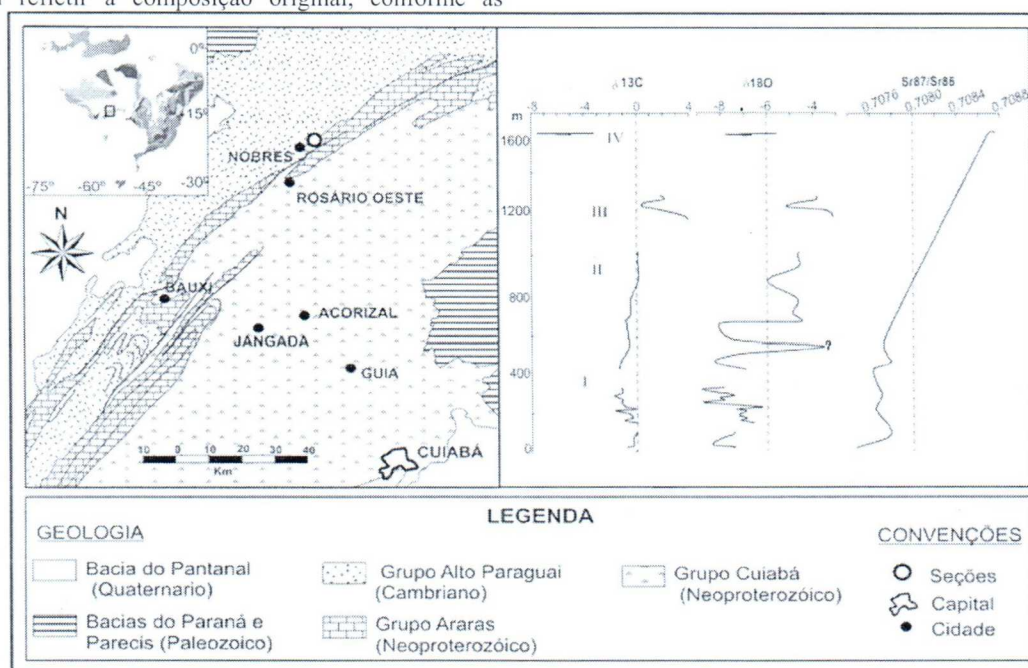
FORMAÇÃO GUIA

Para esta seção foram analisadas 6 amostras de calcários, que apresentaram valores de $\delta^{13}\text{C}$ levemente negativos, variando entre $-0,757$ e $-0,078$ ‰, sendo os valores mais negativos estratigraficamente mais basais. As análises petrográfica e química demonstraram que as amostras não sofreram alterações pós-deposicionais, conforme demonstram as baixas razões $\text{Mn}/\text{Sr} < 0,15$, $\text{Fe}/\text{Sr} < 0,4$ e $\text{Rb}/\text{Sr} < 0,006$. No entanto estão presentes estilólitos, comuns a calcários, que foram devidamente evitados no *drilling*. A composição isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ varia entre $-8,381$ e $-7,432$ ‰, sem correlação com a razão Mg/Ca . Duas amostras, próximas uma à base e outra ao topo, desta seção foram analisadas para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,



apresentando valores isotópicos de 0,707466 e 0,707789, respectivamente. As composições isotópicas de Sr parecem refletir a composição original, conforme as

baixas razões de Rb/Sr (acima) e alta concentração de Sr (525,7 e 1261,8 ppm).



INTERCALAÇÃO ENTRE DOLOMITOS E CALCÁRIOS

Foram analisadas isotopicamente 17 amostras desta seção, com valores $\delta^{13}\text{C}$ entre 0,029 e -1,704‰, sendo que, dentro deste intervalo, os valores maiores que -1‰ estão nos primeiros 92m e os valores menores que -1‰ estão nos 96 m subseqüentes. Os calcários deste intervalo aparentemente não sofreram alteração por processos posteriores, como se observa nas baixas razões Mn/Sr <0,12, exceto uma camada de dolomito calcífero laminado com Mn/Sr de 0,311, ainda assim não muito alta. As razões Fe/Sr variam (entre 0,039 e 3,443) conforme o conteúdo de sílica aumenta (0,05 a 11,21%), certamente como reflexo de conteúdo terrígeno, ainda que baixo, em algumas amostras. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos variam de -6,554 a -8,852‰, com a mesma posição dos valores para $\delta^{13}\text{C}$, os valores maiores que -7,4 ‰ situam-se na primeira metade da seção, enquanto os menores que -7,4 ‰ estão na metade superior, parecendo não haver correlação com as razões Mg/Ca. Desta seção, cinco amostras (com razões Rb/Sr <0,008) foram analisadas para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, obtendo-se valores entre 0,707647 e 0,707710, oscilando em zig-zag ao longo da seqüência.

FORMAÇÃO NOBRES

Para esta seção foram selecionadas 18 amostras para análise isotópica de C e O, na maioria dolomiticos. Os resultados de $\delta^{13}\text{C}$ variam entre -1,343 e 3,906 ‰, ressaltando-se que os valores negativos encontram-se nos primeiros 380m da seção, valores próximos de zero

(0,087 a 0,149‰) na porção intermediária (~380 a 580 m) e valores positivos de 0,430 a 3,906 ‰ próximo ao topo (nos 150m finais). Os calcários apresentam razões Mn/Sr <0,063 e Rb/Sr <0,009, enquanto que nos dolomiticos essas razões aumentam (Mn/Sr 0,398-0,916 e Rb/Sr 0,014-0,111), mostrando possível alteração diagenética, não muito intensa, talvez devido ao processo de dolomitização de alguns carbonatos. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ oscilam entre -3,213 e -8,288‰, sem correlação com a razão Mg/Ca. Para análises isotópicas de Sr foram selecionadas 3 amostras de calcário (apenas da base da seqüência) com razões Rb/Sr <0,009, que forneceram resultados $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variando entre 0,707630 e 0,707793, continuando o padrão oscilatório da seção anterior.

FORMAÇÃO SERRA AZUL

Nesta seção de topo foram analisadas 7 amostras de calcário. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtidos variam entre -3,210 e -7,472. Com exceção de uma amostra (Mn/Sr 0,478 e Fe/Sr 2,259), todas as outras possuem Mn/Sr de 0,081 a 0,282 e razão Fe/Sr de 0,405 a 1,075, que asseguram a preservação das razões isotópicas originais. Os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ variam entre -5,548 e -7,792, sem correlação aparente com Mg/Ca. Para os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, analisou-se duas amostras, com razões 0,708695 e 0,708759. As razões Rb/Sr, que garantem a preservação das razões isotópicas originais destas amostras, são 0,006 e 0,005, respectivamente.



DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As seções descritas acima podem ser empilhadas, compondo uma seqüência quimioestratigráfica única de 1700 m. Como tais rochas ainda não possuem uma idade absoluta, pode-se estimar uma idade relativa com base nas curvas de variação temporal de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $\delta^{13}\text{C}$ (Jacobsen and Kaufman, 1999; Walter *et al.*, 2000). Comparando os valores obtidos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $\delta^{13}\text{C}$ com as duas curvas, tem-se o início da deposição do Gr. Araras por volta de 590-580 Ma ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,707466 e $\delta^{13}\text{C}$ -0,757‰) e a deposição da capa carbonática da Fm. Serra Azul entorno de 543 Ma, bem próximo ao limite entre Ediacariano e Cambriano, ou seja, cerca de 1700 m de sedimentos (sendo 1400 m carbonato) depositados em aproximadamente 40 Ma.

As curvas isotópicas desta seqüência mostram que a mesma pode ser quimioestratigraficamente dividida, numa primeira análise, em quatro intervalos distintos: (i) o intervalo I corresponde aos primeiros ~800 m da seqüência (abrangendo as seções da Fm. Guia, Intercalação entre dolomitos e calcários e a parte basal da seção Fm. Nobres), com valores $\delta^{13}\text{C}$ negativos $> -1,704$ ‰; (ii) o intervalo II, de ~800-1100 m (corresponde porção mediana da Fm. Nobres), com valores $\delta^{13}\text{C}$ positivos próximos de zero; (iii) o intervalo III, de 1100-1400m (corresponde a porção de topo da Fm. Nobres), com valores $\delta^{13}\text{C}$ positivos variando de 3,906 a 0,430‰; e (iv) o intervalo IV no topo da seqüência (Fm. Serra Azul) com valores $\delta^{13}\text{C}$ bastante negativos (entre -7,472 e -3,210‰).

A deposição do intervalo I parece ter se dado sob condições climáticas de baixa temperatura e pouca bioatividade, conforme os valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$, em águas pouco oxigenadas e com baixa salinidade, de inframaré, como mostra os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (< -6 ‰), confirmado pela grande quantidade de calcário laminado rico em matéria orgânica (ambiente redutor). As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostram um rápido aumento na base, provavelmente relacionado a altas taxas de intemperismo devido a deglaciação Puga, seguido de oscilações padronizadas, que refletem variações no nível do mar, confirmadas pela intercalação de calcário laminado com matéria orgânica e lentes de dolomito ou brechas.

O intervalo II mostra que sua deposição se deu em clima um pouco mais quente que o intervalo anterior, surgindo ambiente favorável para certo aumento da bioatividade, como mostra os valores $\delta^{13}\text{C}$ levemente positivos. Já os valores de $\delta^{18}\text{O}$ acusam deposição em ambiente de intermaré, com salinidade intermediária (-6 a -4‰), como pode ser comprovado pelo início da seqüência essencialmente dolomítica e com presença de brechas, arcóseos, doloarenitos e oólitos.

As condições de deposição para o intervalo III mostradas pelo $\delta^{18}\text{O}$ passam a ser predominantemente de águas mais rasas, com maior oxigenação e salinidade, certamente de supramaré, eventualmente intermaré, conforme mostra a presença de dolomitos primários, *hummocks*, intraclastos e estromatólitos. Os altos valores de $\delta^{13}\text{C}$ mostram expressivos aquecimento e aumento da bioatividade.

O intervalo IV encontra-se após a deposição de espessa seqüência de diamictitos e laminitos da Fm. Serra Azul, com valores $\delta^{13}\text{C}$ bastante negativos que evidenciam a glaciação. Os valores $\delta^{18}\text{O}$ indicam transição de ambiente de inframaré para intermaré no topo, com passagem dos laminitos para calcário laminado seguido de calcário com estratificação cruzada. O expressivo aumento nos valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostram aumento significativo nas taxas de intemperismo continental, que certamente está relacionado à glaciação Serra Azul, um dos mais poderosos processos erosivos (Banner, 2004).

Com os dados apresentados comprova-se a presença de duas glaciações Ediacaranas na Faixa Paraguai, a mais antiga correspondente a Fm. Puga e a mais jovem a Fm. Serra Azul, sendo esta última a mais jovem glaciação Neoproterozóica encontrada no continente Sul-Americano até o momento, com idade próxima ao limite com o Cambriano. Com os atuais resultados, põe-se em questão se a Fm. Puga não estaria relacionada à glaciação Gaskiers de 580 Ma, ao invés da glaciação Marinoana de 600 Ma, que será respondida mediante mais estudos quimioestratigráficos de detalhe e a descoberta de rochas que possam ser datadas geocronologicamente.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M.de 1964. Geologia do Centro-Oeste Matogrossense. Minist. Minas Energ., Dep. Nac. Prod. Miner., Bol. Div. Geol. Mineral, 215: 1-137.
- Alvarenga, C.J.S.de & Trompette, R. 1993. Brasiliano Tectonic of the Paraguay Belt: the structural development of the Cuiabá Region. *Rev. Bras. Geocienc.* 23:18-30.
- Alvarenga, C.J.S.de, Moura, C.A.V., Gorayeb, P.S.S., Abreu, F.A.M.de 2000. Paraguay and Araguaia Belts. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Tomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds), *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geol. Cong.*, Rio de Janeiro, pp. 183-193.
- Alvarenga, C.J.S.de, Santos, R.V., Dantas, E.L. 2004. C-O-Sr isotopic stratigraphy of cap carbonates overlying Marinoan-age glacial diamictites in the Paraguay Belt, Brazil. *Precamb. Res.*, 131: 1-21.
- Alvarenga, C.J.S.de, Figueiredo, M.F., Babinski, M., Pinho, F.E.C. (submetido). Glacial diamictites of Serra Azul Formation (Ediacaran, Paraguay Belt): evidence of the Gaskiers glacial event in Brazil. *J. South Am. Earth Sci.*
- Banner, J.L., 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to Herat surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Sci. Rev.* 65, 141-194.
- Figueiredo, M.F., Babinski, M., Alvarenga, C.J.S.de, Pinho, F.E.C., 2004. Diamictites overlying Marinoan-age carbonates of Araras Formation, Paraguay Belt, Brazil: evidence of a new glaciation? In: *Symp. on Neoproterozoic-Early Paleozoic Events in SW-Gondwana, IGCP Project 478, Second Meeting, Brazil*, p. 18-19.
- Figueiredo, M.F., Babinski, M., Alvarenga, J.C.S.de, Pinho, F.E.C. 2005. Nova unidade litoestratigráfica: Formação Serra Azul, Faixa Paraguai, Mato Grosso. IX Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia.
- Halverson, G.P., Maloof, A.C., Hoffman P.F. 2004. The Marinoan glaciation (Neoproterozoic) in northeast Svalbard. *Basin Res.*, 16:297-324.
- Jacobsen, S.B. & Kaufman, A.J. 1999. The Sr, C and O isotope evolution of Neoproterozoic seawater. *Chem. Geol.* 161:37-57.



- Kendall, B.S., Creaser, R.A., Ross, G.M., Selby, D. 2004. Constraints on the timing of Marinoan "Snowball Earth" glaciation by ^{187}Re - ^{187}Os dating of a Neoproterozoic, post-glacial black shale in Western Canada. *Earth Plan. Sci. Let.* 222:729-749.
- McCrea, J.M. 1950. On the Isotopic chemistry of carbonates and paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18:849-857.
- 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. *Geol.*, 31: 613-616.
- Walter, M.R., Veevers, J.J., Calver, C.R., Gorjan, P., Hill, A.C., 2000. Dating the 840-544 Ma Neoproterozoic interval by isotope of strontium, carbon and sulfur in seawater, and some interpretative models. *Precamb. Res.* 100:371-433.