

Proveniência sedimentar dos arenitos da Bacia do Parnaíba (NE do Brasil)

Sedimentary provenance of sandstones in the Parnaíba Basin (NE Brazil)

Maria Helena Bezerra Maia de Hollanda | Ana Maria Góes | Daniela Batista da Silva | Francisco de Assis Negri

resumo

Este artigo tem por objetivo reconhecer a proveniência dos arenitos paleozoicos-triássicos da Bacia do Parnaíba (NE do Brasil), através da aplicação de técnicas convencionais em Sedimentologia e Geocronologia. O estudo petrográfico e análise da assembleia de minerais pesados mostram que os arenitos fluviais e deltaicos foram afetados por processos de dissolução intraestratal e paleopedogênese, assim dificultando o reconhecimento de indicadores característicos de proveniência. Os resistatos mais comuns são zircão, turmalina e rutilo, com presença limitada de estauroлита, cianita, silimanita, epidoto e granada. Essa paragênese, integrada à avaliação de paleocorrentes e à identificação petrográfica de clastos xistosos, aponta a contribuição de rochas metassedimentares como fonte de detritos para o preenchimento da bacia. A similaridade observada entre os espectros de idades de zircão detrítico de todas as unidades estudadas é indicativa da recorrência de fontes paleo- e neoproterozoicas. O Paleoproterozoico é dominante nos crátons que

circunscrevem a Bacia do Parnaíba, bem como no embasamento das províncias neoproterozoicas, não se configurando, nesse caso, uma população decisiva para diferenciar fontes particulares. O Neoproterozoico caracteriza-se por duas populações principais: idades estenianas-tonianas e ediacaranas. A presença persistente da população esteniana-toniana em todas as unidades leva à correlação direta com as rochas relacionadas ao evento Cariris Velhos (1.050-900 Ma), informação essa que fortemente indica a Província Borborema como uma área-fonte principal de detritos. Durante o estágio de continentalização, no Triássico, é possível que processos de reciclagem interna tenham sido dominantes. Ao contrário das demais unidades, a população de idades associadas ao evento Cariris Velhos do paleodeserto Sambaíba é subordinada, em certa extensão semelhante ao padrão definido para os arenitos fluviais e deltaicos do Grupo Serra Grande, sugerindo que estes estariam disponíveis como fonte topograficamente soerguida para remoção eólica de detritos.

Palavras-chave: Bacia do Parnaíba | proveniência sedimentar | geocronologia u-pb | minerais pesados

abstract

This paper aims at recognizing the provenance signature of the triassic-paleozoic sandstones in the Parnaíba basin, NE Brazil, through the application of conventional techniques used in Sedimentology and Geochronology. The petrographic study and heavy mineral analyses show that the deltaic and fluvial sandstones were affected by intrastratal dissolution processes and paleopedogenesis, thus making the identification of original provenance markers difficult. The most common resistant minerals are zircon, tourmaline and rutile, with limited presence of staurolite, kyanite, sillimanite, epidote and garnet. This paragenesis, together with the evaluation of paleocurrents and the petrographic identification of schist clasts, points to the contribution of metasedimentary rocks as a potential source of detritus for the filling of the basin. The similarity observed among the detrital zircon-age spectra of all the units studied is indicative of the recurrence of Paleo and Neoproterozoic sources. The Neoproterozoic source is dominant in the cratons that circumscribe the Parnaíba Basin, as well as in the basement of the Neoproterozoic provinces, in this case not forming a decisive population to differentiate individual sources. The Neoproterozoic is characterized by two principal populations: the Stenian-Tonian and the Ediacaran. The persistent presence of the Stenian-Tonian in all of these units leads to a direct correlation with the rocks related to the Cariris Velhos event, which occurred between 1050-900 Ma ago, strongly indicating the Borborema Province as a principal source-area of the detritus. During the continent forming stage in the Triassic period, it was possible that internal recycling processes were dominant. Contrary to the other units, the population of ages associated with the Cariris Velhos event of the Sambaíba paleodesert is subordinated in a certain extension similar to the standard defined by the fluvial and deltaic sandstones from the Serra Grande Group, suggesting that they would be available as a topographical source uplifted by the Aeolian removal of the detritus.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: Parnaíba Basin | sedimentary provenance | u-pb geochronology | heavy minerals

introdução

Estudos de proveniência sedimentar associados à caracterização tectônica e paleogeográfica de bacias sedimentares são de grande interesse para exploração de petróleo e gás natural, uma vez que fornecem subsídios para a previsão da porosidade e permeabilidade de rochas-reservatório. Várias técnicas são utilizadas, destacando-se o controle de paleocorrente, a caracterização de minerais pesados e a datação de grãos de zircão detríticos. Estudos de paleocorrentes são considerados clássicos e fortemente recomendados para a reconstituição do sentido do fluxo de detritos. A análise de minerais pesados é uma das técnicas mais amplamente utilizadas em estudos de proveniência sedimentar de sequências siliciclásticas devido às suas especificidades em indicar fontes particulares (Haughton *et al.*, 1991; Mange e Maurer, 1992). A distribuição desse grupo de minerais é controlada pela paleogeografia, pela natureza da rocha-fonte e por todos os mecanismos comuns ao ciclo sedimentar, entre os quais o padrão de dispersão hidráulica e os processos diagenéticos. O grau de influência desses processos pode modificar a assinatura original de proveniência, mas estes efeitos podem ser minimizados por meio da adição de outros critérios independentes ao estudo de minerais pesados. Dentre esses se recomenda a seleção da fração granulométrica adequada, o reconhecimento dos diferentes graus de estabilidade química e física dos minerais e avaliações petrográficas para identificar a intensidade dos processos diagenéticos na alteração da assinatura de proveniência. Outra técnica auxiliar para amplificar o sinal de proveniência foi proposta por Morton e Hallsworth (1994) e preconiza o uso de razões entre minerais com mesmo comportamento hidráulico e diagenético, como, por exemplo, o índice rutilo/zircão (RZi), em que as variações são atribuídas às mudanças de fonte.

Dadas as limitações inerentes à análise de proveniência convencional, a principal delas relaciona-se à preservação das assembleias minerais originais, e por isso vários métodos geocronológicos vêm sendo utilizados para datação de minerais detríticos-U-Pb em zircão, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em micas, U/Th-He e Traços de Fissão em zircão e apatita. O objetivo é a datação de grãos individuais que possam informar com relativa precisão a idade de

rochas-fonte (Nemchin e Cawood, 2005; Morton *et al.*, 2005). Dentre todos, o método U-Pb em zircão detrítico é, sem dúvida, o mais robusto, dada a resistência deste mineral aos processos superficiais que estão envolvidos desde a desagregação da fonte até a diagênese pós-deposicional. O desenvolvimento das técnicas de análise *in situ* por espectrometria de massas favoreceu largamente a aplicação em estudos de proveniência que, no Brasil, têm sido direcionados principalmente a sucessões sedimentares pré-cambrianas. Nesses casos, a abordagem tem sido usada para:

- reconhecer as áreas-fonte dos sedimentos;
- estimar a idade máxima de deposição, especialmente importante em bacias onde não há registro de atividade vulcânica que possa ser usado como marcador temporal direto da sedimentação;
- definir o contexto tectônico de instalação da bacia (ambiente convergente/colisional ou ambiente extensional);
- estabelecer correlações estratigráficas entre sucessões desmembradas por processos tectônicos subsequentes.

A carência de estudos de proveniência sedimentar na Bacia do Parnaíba motivou, em 2012, a realização de um projeto no âmbito P&D denominado “Proveniência sedimentar da Bacia do Parnaíba com base em técnicas em sedimentologia e geocronologia”, firmado entre a Petrobras e a Universidade de São Paulo dentro do programa da Rede de Estudos em Sedimentologia e Estratigrafia/Cenpes. O Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) do Instituto de Geociências foi a unidade executora, e a coordenação ficou sob responsabilidade desta autora principal, com apoio de pesquisadores associados a este instituto. Ainda em vigência, o projeto teve por objetivo a aplicação de técnicas geocronológicas (ID-TIMS e LA-ICPMS) para estabelecer a assinatura de proveniência da seção paleozoica da bacia, também incluindo abordagens convencionais de minerais pesados associados a estudos petrográficos e de paleocorrentes. Neste trabalho, são apresentados os resultados obtidos da amostragem significativa e representativa de afloramentos expostos nos

setores nordeste e centro-oeste da Bacia do Parnaíba, os quais representam praticamente todas as suas unidades constituintes. As exceções relacionam-se à Formação Itaim, cuja cartografia ainda não está registrada nos mapas convencionais da área de estudo, e à Formação Pedra de Fogo, pela pouca presença de arenitos no seu arcabouço.

unidades litoestratigráficas sedimentares da Bacia do Parnaíba

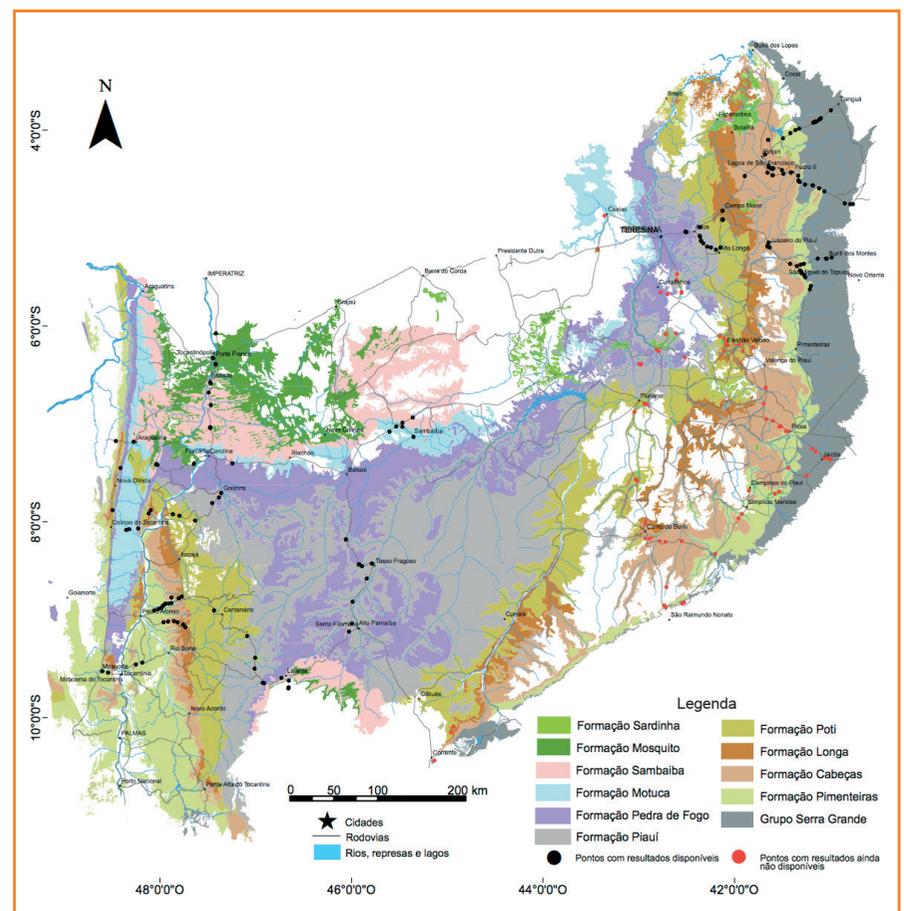
A Bacia do Parnaíba configura uma sucessão predominantemente terrígena paleozoica-triássica exposta em aproximadamente 600 mil km² de área (Lima e Leite, 1978), representados em três grandes sequências deposicionais transgressivas-regressivas – os grupos Serra Grande, Canindé e Balsas (Góes e Feijó, 1994) (fig. 1). A sedimentação começa com o

Figura 1

Mapa geológico da Bacia do Parnaíba. Fonte: Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2004).

Figure 1

Parnaíba Basin geological map. Source: Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2004).



Grupo Serra Grande, mais bem exposto na borda leste da bacia e depositado em contato direto com o embasamento pré-cambriano da Província Borborema. Este grupo foi subdividido nas formações Ipu, Tianguá e Jaicós (Caputo e Lima, 1984), ainda sem cartografia detalhada na bacia. A Formação Ipu (fig. 2a) é a unidade basal, com até 350m de espessura, composta de arenitos e conglomerados fluvioglaciais. A Formação Tianguá (250m de espessura máxima), acima, com domínio de folhelhos pretos a cinza-escuros com intercalações de arenitos atribuídos à primeira inundação máxima marinha. O ciclo encerra-se com a Formação Jaicós (fig. 2b), constituída de arenitos e conglomerados fluviais que alcançam 380m de espessura. Estudos recentes realizados por Grahn *et al.*, (2005), com base em zoneamento com quitinozoários e miosporos, atribuem idade Ilandoveriana para o topo da Formação Ipu, toda a Formação Tianguá e a parte inferior da Formação Jaicós. Para a parte superior da Formação Jaicós, os quitinozoários sugerem deposição no Pragiano-Emsiano.

A sedimentação do Grupo Canindé inicia-se com a Formação Itaim (Eoefeliano), antes considerada um membro inferior da Formação Pimenteiras (Pedreira da Silva *et al.*, 2003). Seus arenitos finos intercalados com folhelhos, de coloração entre amarelo e vermelho, não ultrapassam espessuras máximas de 250m e são considerados de ambiente marinho raso (Santos e Carvalho, 2009). A Formação Pimenteiras (neoeifeliana), com espessura de até 320m, é formada de folhelhos cinza-escuros (figs. 2c e 2d) com intercalações de arenitos amarelados com níveis de oólitos piritosos, os quais representam a máxima transgressão marinha que ocorreu em toda a bacia (Lima e Leite, 1978). Essa sucessão, atribuída a plataformas terrígenas com barras de *offshore* dominadas por tempestade (Della Fávera, 1990), é seguida pelos diamictitos glaciais e arenitos deltaicos da Formação Cabeças (fig. 2e), com espessura máxima de 350m e provável idade neofrasniana-eofameniana (Santos e Carvalho,

2009). Os folhelhos e arenitos subordinados da Formação Longá (espessura máxima de 220m) representam uma nova fase de transgressão marinha (fig. 3a). O ciclo se encerra com os arenitos regressivos e folhelhos subordinados da Formação Poti (fig. 3b) no Eocarbonífero, interpretados como de ambiente deltaico com retrabalhamento de ondas.

Finalmente, o Grupo Balsas se inicia com a Formação Piauí (Neocarbonífero), formada de arenitos róseos a vermelhos com intercalações de folhelhos vermelhos com leitos de sílex e carbonatos subordinados (fig. 3c). Sua espessura máxima é de 350m, sendo sua deposição atribuída a ambientes litorâneo a continental, mais quente e árido. A Formação Pedra do Fogo apresenta siltitos, calcários, silixitos e folhelhos esverdeados, com arenitos subordinados com espessura máxima de 250m e de idade mesopermiana. A Formação Motuca (Permiano Superior) é composta de folhelhos, calcários e anidritas, siltitos e arenitos com espessura máxima de 280m (fig. 3d), depositados em lagos continentais em clima semiáridos. Por fim, o Grupo Balsas fecha esse ciclo com os arenitos eólicos de ambiente desértico da Formação Sambaíba, supostamente de idade triássica, que ocorrem restritamente no centro-oeste da Bacia do Parnaíba (fig. 3e) e atingem espessura máxima de 440m. Uma faixa mais estreita é registrada no sul do estado de Tocantins, próximo à cidade de Lizarda, onde esses arenitos fazem contato com os arenitos cretáceos da Bacia Sanfranciscana (fig. 3f). Essa supersequência Balsas mostra tendência progressiva de continentalização e desertificação, levando à retração da região de acumulação de sedimentos na Bacia do Parnaíba. Portanto, a Formação Sambaíba marca o final da condição de bacia intracratônica. Como manifestação precursora da ruptura do supercontinente Gondwana, ocorre intenso magmatismo episódico individualizado nas formações Mosquito e Sardinha (Lima e Leite, 1978; Góes e Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007), respectivamente no Eotriássico e Eocretáceo.

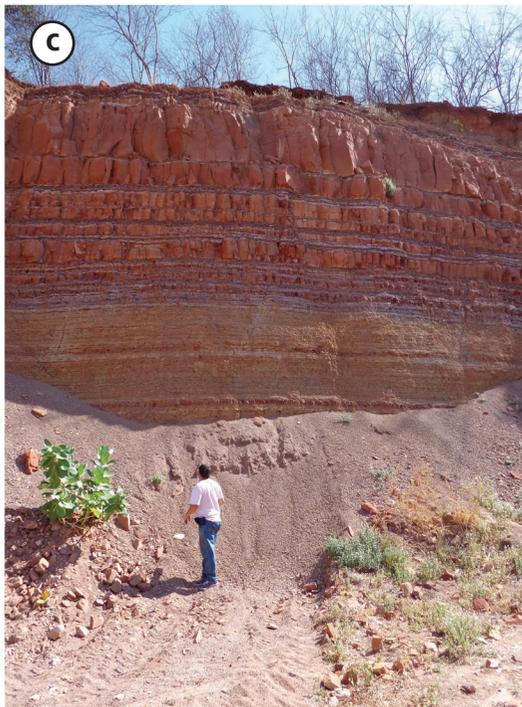


Figura 2

(a) Espesso pacote conglomerático sobreposto a arenitos da Formação Ipu (Grupo Serra Grande), Serra Talhada (PI) – Parque Nacional Serra da Capivara; (b) arenitos com estratificação cruzada tabular da Formação Jaicós (Grupo Serra Grande); (c) Folhelhos laminados da Formação Pimenteiras; (d) sucessão composta de folhelhos e arenitos da Formação Pimenteiras mostrando aumento da granulometria e das espessuras de camadas para o topo, Picos (PI); (e) lobos sigmoidais compostos de arenitos com estratificação cruzada sigmoidal da Formação Cabeças.

Figure 2

(a) Thick conglomeratic package overlapping sandstones from Ipu Formation (Serra Grande Group), Serra Talhada (PI) – Serra da Capivara National Park; (b) sandstones with tabular cross-bedding from the Jaicós Formation (Serra Grande Group); (c) laminated shales from the Pimenteiras Formation; (d) coarsening and thickening upward succession compound of the shales and sandstones from the Pimenteiras Formation, Picos (PI); (e) sigmoidal lobes with sigmoidal cross-bedding sandstones from the Cabeças Formation.

Figura 3

(a) Arenitos com estratificação cruzada *hummocky* da Formação Longá; (b) arenitos róseos ondulados da Formação Poti e arenitos amarelos com estratificação cruzada tabular da Formação Piauí. Notar superfície erosiva que separa as duas unidades; (c) arenitos eólicos com estratificação cruzada da Formação Piauí; (d) contato entre as formações Sambaíba (inferior, Bacia Parnaíba) e Urucuia (superior, Bacia Sanfranciscana), próximo à cidade de Lizarda (MA); (e) arenitos eólicos com estratificação cruzada de grande porte da Formação Sambaíba; (f) contato entre as formações Sambaíba (inferior, Bacia Parnaíba) e Urucuia (superior, Bacia Sanfranciscana), próximo à cidade de Lizarda (MA).

Figure 3

(a) Sandstones with *hummocky* cross-stratification from the Longá Formation; (b) pinkish undulated sandstones from the Poti Formation and yellow sandstones with tabular cross-bedding from the Piauí Formation. Note the erosive surface that separates both units; (c) aeolian sandstones with cross-stratification from the Piauí Formation; (d) contact between the Sambaíba (lower, Parnaíba Basin) and Urucuia (upper, Sanfranciscan Basin) formations near to town of Lizarda (MA); (e) aeolian sandstones with large scale sets of cross-beddings from the Sambaíba Formation; (f) contact between the Sambaíba (lower, Parnaíba Basin) and Urucuia (upper, Sanfranciscan Basin) formations near to Lizarda town (MA).



métodos aplicados

geologia sedimentar

A preparação de minerais pesados seguiu os procedimentos sugeridos por Mange e Maurer (1992), com intervalo granulométrico selecionado entre 0,125-0,062mm e concentração dos minerais pesados através de decantação com bromofórmio. O concentrado é montado em lâmina de vidro com bálsamo do Canadá natural, e a identificação dos minerais feita sob microscópio petrográfico. Logo após, foram realizadas as seguintes contagens dedicadas:

- 1) Trezentos grãos de minerais pesados, transparentes, não micáceos para o cálculo da frequência relativa, permitindo determinar a composição total da assembleia de minerais pesados;
- 2) Duzentos grãos do par rutilo-zircão para obter a quantificação do índice RZi [$RZi = 100 \cdot \text{rutilo} / (\text{rutilo} + \text{zircão})$] para avaliar mudanças nas fontes de sedimentos (Morton e Hallsworth, 1994).

A análise petrográfica é utilizada de forma expedita e adicional ao estudo de minerais pesados, visando entender o quanto os processos diagenéticos modificaram a assinatura original. Foram selecionados 31 arenitos litificados para confecção de seções delgadas representativos das unidades mais antigas da Bacia do Parnaíba, com ênfase nos grupos Serra Grande e Canindé. O procedimento adotado é uma estimativa modal dos componentes deposicionais e diagenéticos junto com uma descrição textural.

As avaliações de paleocorrentes foram tomadas preferencialmente em estratos fluviais e deltaicos, sendo que as estruturas escolhidas foram estratificações cruzadas. O maior volume de dados gerados concentrou-se nas exposições do Grupo Serra Grande nas porções nordeste e sudeste e, subordinadamente, da Formação Cabeças nos setores nordeste e centro-oeste da bacia.

U-Pb em zircão detrítico

A geocronologia U-Pb em zircão detrítico é baseada no decaimento dos radioisótopos ^{238}U e ^{235}U para os isótopos radiogênicos ^{206}Pb e ^{207}Pb , respectivamente. A relação ideal entre esses sistemas dentro de um mineral portador de U produz uma idade concordante. Como premissa para a obtenção de idades concordantes usando-se técnicas *in situ*, é necessário o conhecimento prévio da estrutura interna do zircão. Desse modo, é possível reconhecer padrões de crescimento que indiquem história simples ou multifásica e complexa em escala micrométrica.

O protocolo para separação mecânica é convencional e foi aplicado para cada amostra individualmente, envolvendo desde a simples britagem até a separação física dos minerais com base em características hidráulicas, magnéticas, de densidade e, por fim, a purificação em lupa binocular. Cerca de 200-300 grãos de zircão são selecionados para montagem em discos de resina epóxi, os quais são polidos até expor aproximadamente a metade dos grãos. A seguir, os grãos são imageados por luz transmitida em lupa e por catodoluminescência acoplada a um microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 250. As razões isotópicas são medidas em um espectrômetro de massas multicoletor com plasma indutivamente acoplado – *Neptune* (ThermoScientific), com um laser *Excimer* Ar-F (193nm) operando com 5mJ/cm² e frequência de 6Hz, para atingir um spot com diâmetro de 29µm. As intensidades das massas ^{202}Hg , ^{204}Pb comum, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb e ^{238}U são adquiridas em 40 ciclos de 1 segundo, obedecendo a uma sequência de 2 brancos – 3 análises do padrão internacional GJ-1 (Jackson *et al.*, 2004) – 13 análises pontuais em zircões da amostra, 2 padrões GJ-1 e 2 brancos. Para a redução matemática dos dados brutos foi usado um programa interno desenvolvido em linguagem *Python* (Siqueira *et al.*, 2014). Após a redução, os dados são filtrados para concordância de 100%±10 entre as razões $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ e manipulados para apresentação no formato de curvas de densidade de probabilidade normalizadas e de probabilidade cumulativa conforme as rotinas publicadas em Gehrels (2012).

resultados

petrografia

Ainda que seja pouco eficiente na determinação de padrões de proveniência, a análise petrográfica mostra claramente que os processos diagenéticos afetaram fortemente as rochas mais antigas da Bacia do Parnaíba. Isso, sem dúvida, constitui um dos fatores marcantes na modificação das assinaturas originais de minerais pesados. De modo geral, todas as 31 rochas estudadas apresentam-se bem cimentadas, devido ao sobre crescimento de grãos de quartzo que torna forte a litificação das rochas. Em termos de sua constituição petrográfica, os fragmentos líticos xistosos são mais abundantes nos dez arenitos do Grupo Serra Grande, com diminuição de ocorrência nas demais formações estudadas, principalmente do Grupo Canindé. Nos arenitos Serra Grande, a composição varia de sublítica a lítica com ocorrência de 5% a 20% de fragmentos de rochas xistosas e, mais raramente, de rochas granitoides. O maior percentual de líticos é notado nas fácies fluviais grossas, em concordância com a presença de grânulos de quartzo policristalino. Em todas as amostras estudadas, os efeitos diagenéticos são dominantes, notadamente a compactação mecânica registrada pela deformação de fragmentos de rochas metapelíticas e de grãos grossos de muscovita, favorecendo a formação de pseudo-matriz. Somam-se os fortes efeitos de dissolução e alteração de feldspatos e de fragmentos líticos, que dificultam o reconhecimento dos constituintes modais nesses arenitos sob microscópio convencional. Além disso, os estudos petrográficos mostram aumento do grau de arredondamento de quartzo e feldspatos no sentido das unidades mais jovens.

minerais pesados

O estudo revelou ausência de padrões de proveniência diferenciada a partir da análise de 80 arenitos distribuídos em todas as unidades estudadas, nas faixas aflorantes a nordeste (41) e centro-oeste (39). Dos 24 mil grãos pesados quantificados verifica-se que, em ambos os setores, zircão, turmalina e rutilo (fig. 4a) são os principais formadores de todas as amostras estudadas, sem

distinção estratigráfica. Apesar disso, quando se avaliam os valores médios obtidos em cada formação da porção centro-oeste, nota-se o aumento progressivo do volume de zircão das formações mais antigas para as mais novas, acompanhado pelo aumento do grau de arredondamento dos grãos de zircão. Esse padrão é mais expressivo nas fácies eólicas da Formação Piauí e, sobremaneira, nos arenitos Motuca e Sambaíba, sugerindo aumento no grau de retrabalhamento ou reciclagem interna da bacia. Essa tendência estratigráfica não foi observada na porção nordeste da bacia.

Fatores adicionais que contribuem para o amplo domínio de minerais ultraestáveis em todas as unidades estudadas, além da intensa dissolução intraestratal confirmada na análise petrográfica, podem ser atribuídos ao desenvolvimento de paleossolos ou telodiagênese. Esses processos são evidenciados pela ampla ocorrência de minerais autigênicos, tais como leucóxênios, pseudorrutilos e anatásios (fig. 4a), os quais não foram quantificados por serem inapropriados a estudos de proveniência.

Como os minerais resistatos são comuns a vários tipos de rochas-fonte, a abordagem convencional do estudo de minerais pesados é pouco eficiente para estabelecer padrões de proveniência. Minerais mais sinalizadores de proveniência, como hornblenda, silimanita, cianita, schellita, epidoto, granada e estauroлита (fig. 4a), são comuns nos arenitos estudados, porém geralmente em percentagens <1%, exceto estas quatro últimas espécies mineralógicas. Por exemplo, a scheelita apresentou valor anormalmente alto (20%), registrado em apenas uma amostra da Formação Pimenteirias. A presença desse mineral sugere proveniência direta da Província Borborema, dada a ocorrência ampla de mineralizações nessa região (Lima *et al.*, 1980). O epidoto está registrado com 20% em volume em uma única amostra do Grupo Serra Grande, coletada na borda nordeste, enquanto a granada ocorre com 12% em uma amostra da Formação Sambaíba coletada na porção centro-oeste da bacia.

Finalmente, a estauroлита teve presença significativa e mais regional nos arenitos Pimenteirias, Cabeças, Longá, Poti, Motuca e Sambaíba coletados no setor centro-oeste da Bacia do Parnaíba, alcançando mais de 20% em algumas amostras da Formação Poti. A presença da estauroлита continua marcante inclusive nos arenitos Motuca

e Sambaíba, onde alcança 15% do volume de minerais pesados transparentes. Nesse caso, a estauroлита ocorre sempre anédrica, angulosa e sem superfícies significativas e alteração superficial. Sua presença como traço na borda nordeste poderia ser explicada pela atuação de processos diagenéticos e de paleointemperismo, já que a presença abundante de fragmentos xistosos nos arenitos Serra Grande, Pimenteiras e Cabeças (ver item Petrografia) evidencia que rochas desta natureza estavam contribuindo com os detritos da Bacia do Parnaíba.

Em relação ao índice de proveniência RZi, não foi observado padrão na borda nordeste, porém no setor centro-oeste os valores apresentam-se progressivamente menores para as unidades mais jovens (fig. 4b). Neste caso, alcançam valores mais altos (40-50) nas formações Pimenteiras, Cabeças e Longá, intermediário (27) na Formação Poti, baixos (12 e 11) nas formações Piauí e Motuca, atingindo o valor 6 nos arenitos triássicos Sambaíba.

Em relação ao ZTR, considerado índice de maturidade, nos arenitos da Bacia do Parnaíba os valores médios são muito homogêneos, entre 85% e 99%, não permitindo diferenciação entre as formações; exceção notada entre os arenitos Cabeças e Poti, nos setores nordeste e centro-oeste. No primeiro, os valores alcançam 98% em ambas as formações e caem para 88% na Formação Cabeças e 87% na Formação Poti na região centro-oeste (fig. 4c).

geocronologia U-Pb em zircão detrítico

Setenta e oito amostras de arenitos coletados em afloramentos diferentes dos setores nordeste e centro-oeste da Bacia do Parnaíba foram analisadas para geocronologia U-Pb em zircões detríticos. O total de dados analíticos gerados é cerca de 3.600: destes, 3.330 forneceram idades concordantes, que foram usadas como *proxy* de proveniência. Para algumas das unidades litoestratigráficas a recuperação de zircão foi muito baixa, notadamente nos arenitos das formações Longá, Pedra de Fogo e Motuca. Nesses, os cristais de zircão tinham dimensões médias muito reduzidas, em torno de 70µm x 40µm, e por esta razão comumente quebravam-se durante a interação com laser. Particularmente para a Formação Pedra de Fogo, a baixa recuperação foi acentuada pelo forte grau de silicificação associado

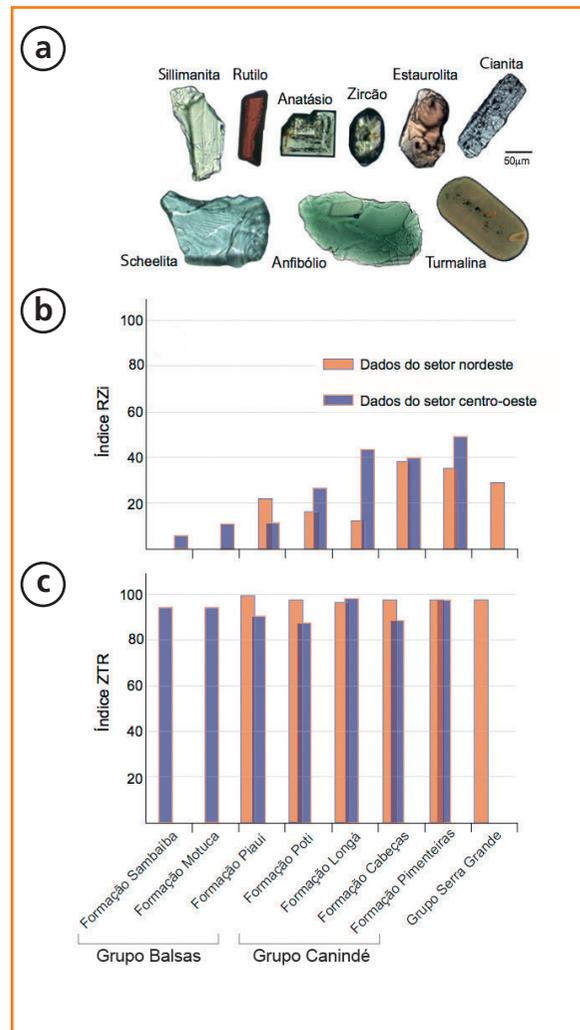


Figura 4 – (a) Fotomicrografias dos principais minerais pesados identificados em lâmina e histogramas de índices minerais ZTR (b) e RZi (c).

Figure 4 – (a) Photomicrographies of the principal heavy mineral assemblage identified in lamina and histograms of mineral indices ZTR (b) and RZi (c).

a esses arenitos, de forma que foram excluídos desse estudo. Quanto à morfologia, os grãos detríticos apresentam tipos prismáticos muitas vezes com alongação primária e terminações bipiramidais ainda preservadas; tipos abradados são obviamente comuns, com aspectos variáveis entre arredondados (particularmente observados nos arenitos eólicos da Formação Sambaíba) a subarredondados, indicando forte retrabalhamento por transporte.

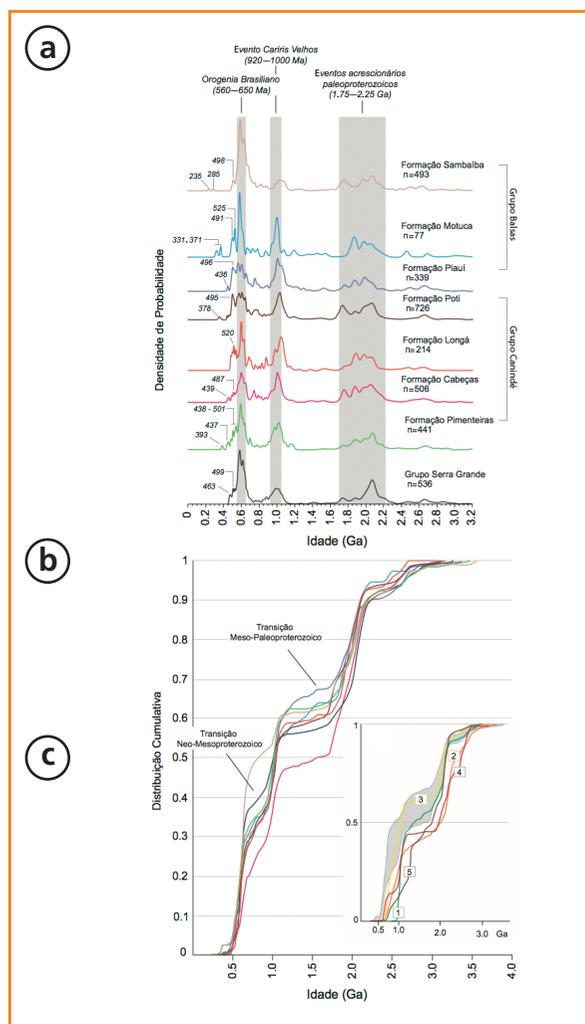


Figura 5 - Curvas de probabilidade de densidade (a) e distribuição cumulativa (b) de idades de zircões detríticos. (c) Curvas médias de distribuição cumulativa calculadas a partir da assinatura de proveniência de rochas metassedimentares da Província Borborema cuja idade de deposição está associada ao evento Cariris Velhos [1] (Marulanda, 2013) e outras que ocorrem nos domínios Setentrional [2] (Araújo et al., 2012; Hollanda et al., 2015), Central (Zona Transversal) [3] (Neves et al., 2009; Guimarães et al., 2012) e Meridional [4] (Oliveira et al., 2006; Caxito et al., 2013). A curva [5] representa as idades de zircões detríticos de rochas metassedimentares da Faixa Brasília (Piuzana et al., 2003; Rodrigues et al., 2010; 2012; Pimentel et al., 2011). A área em cinza representa o conjunto das curvas de probabilidade de densidade individualizadas em (B).

Figure 5 - (a) Density probability and (b) Cumulative distribution curves using the detrital zircon ages. (c) - Mean cumulative distribution curves calculated from the detrital zircon provenance of metasedimentary successions from the Borborema Province, whose depositional age is related to the Cariris Velhos event [1] (Marulanda, 2013) and those occurring in the Setentrional [2] (Araújo et al., 2012; Hollanda et al., 2015), Central (Transversal Zone) [3] (Neves et al., 2009; Guimarães et al., 2012) and Meridional [4] (Oliveira et al., 2006; Caxito et al., 2013) domains. Curve [5] represents the detrital zircon ages of the metasedimentary rocks from the Brasília Belt (Piuzana et al., 2003; Rodrigues et al., 2010 and 2012; Pimentel et al., 2011) The grey area represents the set of density probability curves individualized (B).

Os dados são apresentados na forma de curvas de probabilidade de densidade (CPD) e distribuição cumulativa (CDC), ilustrados nas figuras 5a e 5b, respectivamente. As curvas de probabilidade de densidade são construídas a partir do agrupamento das idades e erros individuais dos grãos analisados em cada amostra, permitindo assim comparar a distribuição volumétrica das principais populações de idades detríticas. Dada a quantidade de amostras manipuladas até o momento ($n = 78$) e cujos resultados são aqui apresentados, as curvas individuais referem-se ao agrupamento de todos os resultados obtidos para cada unidade litoestratigráfica, sem considerar separadamente a localização geográfica ou ambiente deposicional de cada amostra. A distribuição cumulativa é similar à probabilidade de densidade, exceto que considera a distribuição volumétrica de determinada população de idades dentro de um conjunto maior de dados.

Os arenitos siluro-devonianos do Grupo Serra Grande estão expostos apenas no setor leste da bacia. De maneira geral, o conjunto de dados U-Pb ($n = 536$) para essa unidade mostra três populações importantes, uma no Paleoproterozoico e duas no Neoproterozoico. Na população mais antiga, a distribuição está concentrada no intervalo definido para o Riaciano, com pico entre 2,15-2,0 Ga, bem marcado nas amostras coletadas próximo à cidade de Buriti dos Montes e a SE de Pedro II. Nas amostras analisadas da seção entre São João da Fronteira e Tianguá, a presença de zircões paleoproterozoicos é volumetricamente pouco importante quando comparada aos picos neoproterozoicos. Zircões arqueanos têm baixa representação, com frequência menor que 6% na maioria das amostras analisadas, muito embora possam perfazer entre 10% e 19% em outras. Como aspecto comum a todas as amostras, destaca-se a quase ausência (<2%) de zircões detríticos no intervalo entre o Calimiano e o Ecstasiano (1,6-1,2 Ga; Mesoproterozoico), característica observada também nas unidades do Grupo Canindé. É notória a ampla distribuição de zircões neoproterozoicos com duas assembleias bimodais, definidas na transição Esteniano-Toniano (c. 1.050-900 Ma) e no Ediacarano (c. 650-550 Ma). Quando observadas individualmente, há prevalência de uma ou outra dessas populações neoproterozoicas, mas não necessariamente associada a determinado setor geográfico ou padrão deposicional. Zircões detríticos com idades entre 550-450 Ma (Cambriano-Ordoviciano) representam 6% da população total.

A unidade inferior do Grupo Canindé mapeada na área – Formação Pimenteiras – foi amostrada em apenas três afloramentos na borda nordeste e em nove afloramentos no setor meridional da borda oeste: a SE de Pedro Afonso, próximo à cidade de Miranorte, e em dois perfis a NE de Tocantínia e a NE de Pedro Afonso–Santa Maria de Tocantins (TO). Os dados estão representados por 441 idades concordantes. Ao contrário do padrão ilustrado pelos arenitos do Grupo Serra Grande, nos arenitos heterolíticos Pimenteiras a presença de zircões paleoproterozoicos é menos expressiva, distribuindo-se especialmente no intervalo de idades entre 2,15-1,9 Ga (Orosiriano). Já a proporção de zircões detríticos com idades no intervalo Esteniano-Toniano é maior que naqueles arenitos silurianos, diluindo a importância relativa da população ediacarana quando considerado todo o conjunto neoproterozoico. Novamente, zircões mesoproterozoicos são pouco frequentes (<1%), e as idades cambrianas e ordovicianas, juntas, representam cerca de 8% do total. Destacam-se nesses arenitos dois zircões detríticos com idade média devoniana (c. 393 Ma).

O padrão de proveniência dos arenitos da Formação Cabeças foi definido com amostragem da borda nordeste, ao longo dos perfis Piripiri–Pedro II e Juazeiro do Piauí–Castelo do Piauí, e no setor meridional da borda oeste da bacia, a SE de Pedro Afonso. O conjunto de análises U-Pb concordantes foi obtido em 506 grãos, que forneceram, em sua maioria, idades paleoproterozoicas e neoproterozoicas. O registro paleoproterozoico totaliza cerca de 40% de todo o conjunto, sendo representado em um amplo intervalo entre 2,2-1,7 Ga (Riaciano-Estateriano), mas com picos internos em c. 2,06 Ga, 1,9 Ga e 1,75 Ga. Essas idades mostram a clara prevalência de fontes orosirianas representando o Paleoproterozoico na Formação Cabeças. Zircões mesoproterozoicos e arqueanos são subordinados, e o intervalo Cambro-Ordoviciano perfaz cerca de 4% de todas as idades obtidas. As duas populações neoproterozoicas são iguais àquelas das unidades inferiores.

A Formação Longá está mais bem exposta nos perfis realizados na borda oeste, próximo à cidade de Santa Maria de Tocantins, somando apenas 214 idades concordantes. Nesses arenitos também se destacam as duas populações que melhor caracterizam a proveniência das unidades paleozoicas, o Paleoproterozoico e o Neoproterozoico, cada uma com cerca de 35%. As idades orosirianas entre 2,05 e 1,9 Ga prevalecem sobre aquelas riacianas, sendo

os períodos Estateriano e Sideriano de registro subordinado, bem como o Mesoproterozoico e o Arqueano. O Neoproterozoico é mais bem representado pelas modas esteniana–toniana (c. 1.028 Ma) e ediacarana (idade média em 595 Ma), como em todas as unidades estudadas, mas nos arenitos Longá a distribuição de zircões criogenianos, que totaliza 9% do conjunto analisado, está concentrada em dois picos menores com idades médias em 860 Ma e 673 Ma. A proporção de zircões cambro-ordovicianos é de 8%, com um pico bem definido em 520 Ma.

Por fim, fechando a sedimentação do Grupo Canindé, a Formação Poti reúne o maior conjunto de dados obtido, com 726 idades concordantes. Na borda nordeste, um único sítio geográfico foi amostrado – a Serra de Santo Antonio –, de onde seis amostras foram coletadas. O padrão geral é semelhante ao dos demais arenitos estudados desta unidade, os quais foram coletados na borda oeste, no polígono entre Araguaína–Colina do Tocantins–Palmeirante, bem como em perfil entre as cidades de Lizarda e Centenário. A população paleoproterozoica se distribui em duas modas principais com idades médias em 2,0 Ga e 1,72 Ga, indicando a importância das fontes estateriana e orosiriana–riaciana na deposição da Formação Poti. As idades neoproterozoicas distribuem-se principalmente nos intervalos Esteniano-Toniano (média em 1.012 Ma) e Ediacarano (entre 615-545 Ma). As idades dos zircões detríticos criogenianos estão agrupadas preferencialmente entre 760-723 Ma (12% do total), e a proporção de idades cambro-ordovicianas chega a 8%, com média em 495 Ma. Assim como na Formação Pimenteiras, os arenitos Poti trazem uma quantidade reduzida de zircões detríticos com idades mais jovens, distribuídas entre 439-345 Ma (Devoniano/Frasniano ao Carbonífero/Toumaisiano).

Para o Grupo Balsas, os padrões de proveniência dos arenitos das formações Piauí e Motuca assemelham-se àqueles apresentados para os grupos Serra Grande e Canindé, com algumas discretas diferenças. A Formação Piauí está bem exposta no perfil entre Altos e Alto Longá, na borda nordeste, e no setor central da bacia próximo às cidades de Goiatins e de Tasso Fragoso, cujas amostras coletadas produziram 339 idades concordantes. As amostras da Formação Motuca foram coletadas na borda oeste próximo à cidade de Colinas do Tocantins e no setor centro-norte no entorno da

cidade de São Raimundo das Mangabeiras, tendo fornecido apenas 77 idades concordantes. Em geral, nas duas unidades, o volume de idades neoproterozoicas aumenta significativamente quando comparado à população paleoproterozoica, que permanece com dominância de zircões orosirianos e riacianos. Idades mesoproterozoicas são mais frequentes que nas outras unidades, somando entre 6,5-5% contra proporções menores que <2,5% estimadas para os arenitos dos grupos Serra Grande e Canindé. As duas principais modas neoproterozoicas nesses arenitos são perfeitamente coincidentes entre 1.150 e 950 Ma e no Ediacarano, sendo que o volume de zircões criogenianos é menor nos arenitos da Formação Motuca (6,5% contra 12% nos arenitos Piauí). No Ediacarano, os dados para a Formação Motuca concentram-se em um pico bem definido com idade média em 577 Ma, enquanto para os arenitos da Formação Piauí a distribuição é mais ampla. A proporção de zircões detríticos com idades cambro-ordovicianas aumenta no Grupo Balsas, passando agora a representar cerca de 10% dos dados concordantes. A idade mais jovem obtida para a Formação Piauí é dada por um zircão detrítico de 436 Ma (Siluriano), enquanto para a Formação Motuca quatro grãos informam idades entre 371 e 331 Ma (Devoniano/Fameniano a Carbonífero/Viseano).

Por fim, representando o estágio de continentalização da Bacia do Parnaíba no início do Mesozoico, depositaram-se os arenitos eólicos da Formação Sambaíba, unidade superior do Grupo Balsas. Onze amostras foram coletadas ao longo do perfil entre Estreito e Carolina, e em particular ao longo de uma seção vertical de cerca de 200m na Serra dos Martins. O total de dados somou 493 idades concordantes. Dentre todas as assinaturas de proveniência definidas nesse estudo, o padrão dos arenitos eólicos tem diferenças significativas quando comparado aos demais. O registro paleoproterozoico é, de maneira geral, semelhante ao das demais unidades, com maior concentração de idades entre o Orosiriano e o Estateriano. Zircões mesoproterozoicos não ultrapassam 2% do conjunto, repetindo-se o padrão das unidades mais antigas e distinguindo-a das formações Piauí e Motuca. Da mesma forma, a proporção de idades no intervalo Esteniano–Toniano é menor, com 10% das idades concordantes nos arenitos Sambaíba contra 28-21% nos arenitos fluviais paleozoicos, à exceção do Grupo Serra Grande, cujo volume atinge 16% do total. A análise da população criogeniana (850-630 Ma) e

ediacarana (630-542 Ma) mostra percentagens de 52% e 67%, respectivamente. Por fim, zircões cambro-ordovicianos representam não mais que 3% da moda, com destaque para dois zircões mais jovens: um com idade permiana (285 ± 6 Ma) e outro com idade triássica (235 ± 5 Ma).

discussão

As rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba foram fortemente afetadas por processos de dissolução intraestratal, paleopedogênese e reciclagem interna. A sobreposição destes processos obliterou sobremaneira as assinaturas da proveniência sedimentar, inviabilizando uma análise mais conclusiva pelos métodos convencionais. A identificação dos minerais pesados não teve sensibilidade para detectar padrões de proveniência e nem pôde auxiliar na diferenciação entre as diversas unidades estratigráficas que representam a sedimentação paleozoica da bacia. Os volumes mais significativos de minerais pesados são atribuídos aos resistatos zircão, turmalina e rutilo, os quais não têm acurácia para sinalizar fontes mais específicas. A presença, ainda que em baixas porcentagens, de estaurólita, cianita, silimanita, epidoto e granada, bem como a presença de clastos xistosos observados em seções delgadas indicam que as rochas supracrustais pré-cambrianas, expostas nos domínios das províncias Borborema e Tocantins, foram fontes prováveis de detritos para o preenchimento da bacia.

Essa interpretação é reforçada pelos dados de paleocorrente tomados nas fácies fluviais e deltaicas, as quais foram mais bem observadas no Grupo Serra Grande e na Formação Cabeças. O maior volume de informações dessa natureza ($n = 80$ medidas) foi obtido na excelente exposição fluvial contida no Grupo Serra Grande ao longo de toda a borda nordeste e sudeste. Os paleofluxos são direcionados para NW, denotando que a paleodrenagem Serra Grande dispersava o fluxo sedimentar a partir de detritos gerados em áreas-fontes localizadas a leste-sudeste, hoje representadas pelo embasamento pré-cambriano da Província Borborema. A Formação Cabeças reuniu 27 medidas coletadas na borda nordeste e 7 na borda oeste. No primeiro, o paleofluxo migra para NW, à semelhança do registro Serra Grande, enquanto na borda oeste o paleofluxo é variável entre as direções NE e SE, indicando que os sítios de geração

de detritos se localizaram em áreas hoje expostas no interior das províncias Borborema e Tocantins.

Quando considerados os espectros de idades de zircões detríticos (fig. 5a), as interpretações sobre fontes são mais conclusivas. Primeiro, a análise conjunta mostra que todas as unidades paleozoicas, incluindo a Formação Motuca, têm caracteristicamente dois picos principais no Neoproterozoico (Esteniano–Toniano e Ediacarano) e uma população de idades importante que se distribui dentro do Paleoproterozoico, entre o Riaciano e o Estateriano. A análise em detalhe mostra que, de fato, as diferenças se referem principalmente às proporções percentuais de zircões detríticos neo- e paleoproterozoicos. Por exemplo, o Grupo Serra Grande tem 27% de zircões ediacaranos entre 630-542 Ma em todo o conjunto analisado, significativamente maior que a média das demais unidades, que permanece em torno de 18%. No entanto, zircões detríticos estenianos–tonianos (1.200–850 Ma) somam apenas 16% nessa unidade, enquanto nas unidades dos grupos Canindé e Balsas a proporção é de 22-28%. Importante notar que os arenitos eólicos da Formação Sambaíba guardam certa semelhança com as proporções volumétricas de zircões neoproterozoicos presentes nos arenitos fluviais do Grupo Serra Grande. Ambas as unidades têm igual percentual de idades ediacaranas (~27%), mas os arenitos eólicos Sambaíba apresentam destacadamente maior volume de idades criogenianas (21%) que os arenitos Serra Grande (10%), com comportamento inverso para as idades estenianas–tonianas (10% e 16%, respectivamente). Considerando a repetição dos espectros de idades detríticas em toda a pilha sedimentar paleozoica, essas diferenças podem refletir a efetividade dos agentes de erosão e transporte sedimentar influenciando na participação variável das áreas-fontes potencialmente disponíveis. Em adição, a homogeneidade dos espectros sugere que processos de reciclagem intrabacinal podem ter sido relevantes, sobretudo durante a sedimentação eólica dos arenitos mesozoicos da Formação Sambaíba. No entanto, o volume destacadamente superior de zircões com idades entre 850-630 Ma (Criogeniano) requer a participação de fontes primárias criogenianas, visto que esta população não ultrapassa 12% nas demais unidades estratigráficas.

As três principais populações de zircões detríticos caracterizadas nos espectros dos arenitos da Bacia do Parnaíba são reconhecidas como rochas ígneas ou metamórficas hoje expostas na Província Borborema e em sua contraparte africana. Da

mesma forma, representantes de idade arqueana a neoproterozoica são conhecidos nos domínios da Província Tocantins, enquanto os crátons Amazônico, São Francisco e Oeste Africano englobam o grande volume de rochas arqueanas a paleoproterozoicas cujas idades se comparam àquelas de zircões detríticos encontrados nos arenitos estudados. Uma vez que a informação de proveniência em zircões detríticos é essencialmente cronológica e considerando a provável configuração gondwânica, qualquer uma dessas áreas pode, a priori, ser indicada como fonte potencial. Por outro lado, as paleocorrentes medidas na grande área exposta do Grupo Serra Grande e da Formação Cabeças na borda leste da bacia apontam proveniência direta a partir dos terrenos da Província Borborema, enquanto as poucas medidas nos arenitos Cabeças da borda oeste sugerem maior variação no fluxo da paleodrenagem, de SE para NE. Embora pouco representativa, é possível que a sedimentação nesse setor tenha sido influenciada por áreas-fontes como Cráton Amazônico e os terrenos pré-cambrianos da Província Tocantins. Infelizmente, a escassez de exposições dessas unidades, principalmente do Grupo Serra Grande na borda oeste, não permite comparações diretas com os padrões obtidos na borda leste, de forma a discutir possíveis mudanças de fontes.

A figura 5b apresenta as idades detríticas na forma de curvas cumulativas onde a proporção relativa entre as três principais populações em cada unidade é representada pelos patamares em 2,1-1,8 Ga, 1.100-950 Ma e 650-500 Ma. Os patamares e as transições entre eles são comuns a todas as unidades, o que corrobora a recorrência de fontes com a mesma assinatura cronológica ao longo de toda a sedimentação paleozoica e triássica da Bacia do Parnaíba. A Formação Cabeças destaca-se por apresentar proporção menos expressiva de zircões ediacaranos e maior de zircões paleoproterozoicos com relação às demais, enquanto a curva cumulativa para a Formação Sambaíba confirma a prevalência de idades ediacaranas. As curvas são comparadas com padrões de proveniência de sucessões metasedimentares das províncias Borborema e Tocantins (fig. 5c), as quais foram formadas durante os estágios de evolução do evento Cariris Velhos, restrito aos domínios central e meridional da Borborema, e da orogenia Brasileiro, de caráter mais pervasivo. A curva 1 representa o padrão de proveniência das sucessões metasedimentares relacionadas ao evento Cariris Velhos (Complexo Riacho Gravatá, Sequência

Serra do Olho d'Água e Formação Canabrinha), com idades máximas de deposição em torno de 890 Ma, ao passo que as curvas de 2 a 4 representam, respectivamente, as populações de zircão detrítico das faixas móveis da Província Borborema Setentrional (Seridó, Ceará Central e Martinópolis), Central (São Caetano, Surubim, Sertânia e Rio Una) e Meridional (domínios Macururé, Estância, Vaza-Barris, e Formação Formosa do Rio Preto). A curva 5, por sua vez, representa a proveniência das rochas metassedimentares da Faixa Brasília (grupos Paranoá, Canastra, Ibiá, Vazante e Araxá). Os trabalhos usados como referência dos dados estão indicados na legenda da figura. Nota-se que o patamar Ediacarano (630-550 Ma) característico nas unidades paleozoicas da Bacia do Parnaíba não está representado em quaisquer das sucessões brasileiras, mostrando que certamente o preenchimento da bacia por detritos dessa idade foi fornecido por fontes primárias (em geral granitoides), a despeito do provável aporte proveniente da erosão das faixas móveis pré-cambrianas. À exceção da Formação Sambaíba, que tem proveniência neoproterozoica predominantemente de fontes ediacaranas, as demais unidades registram relevante contribuição esteniana-toniana, a qual está diretamente correlacionada ao magmatismo Cariris Velhos. A proporção de 25-20% de zircões nesse intervalo observada nos arenitos da Bacia do Parnaíba sugere que sua proveniência pode ter tido origem na reciclagem das sucessões metavulcanossedimentares (com $\geq 50\%$ do volume de detritos) e de granitoides hoje expostos nos setores central e meridional da Província Borborema. Populações de idades estenianas-tonianas entre 1.100-950 Ma são menos importantes nas sucessões da Faixa Brasília, bem como constituindo o Arco Magmático de Goiás, de forma que o volume significativo caracterizado na bacia deve, a priori, ser atribuído às áreas-fontes na Província Borborema. A proporção bem distribuída de idades paleoproterozoicas, principalmente orosirianas e riacianas, deixa em aberto a possibilidade de fontes ainda não reconhecidas nas províncias neoproterozoicas, seja Borborema ou Tocantins. Idades entre 2,2-2,0 Ga (Riaciano) são comuns no embasamento da Província Borborema, mas a grande quantidade de zircões entre 2,0-1,8 Ga ainda não tem fontes reconhecidas. É possível que, com o avanço do conhecimento geocronológico do Pré-Cambriano brasileiro, essa lacuna venha a ser preenchida. Por fim, o registro arqueano é extensivo e muito bem preservado nos crátons Amazônico

(onde o Orosiriano está exposto na Província Ventuari-Tapajós) e São Francisco, e em vários núcleos mapeados no interior das províncias Borborema e Tocantins, deixando em aberto o vínculo com uma área-fonte única ou mais.

Uma contribuição subsidiária proveniente das idades de zircões detríticos vem da relação entre a idade do zircão mais jovem encontrado em cada unidade com a idade máxima para o início da sua deposição, conforme discutido em Nelson (2001). Em todas as unidades da Bacia do Parnaíba as idades detríticas mais jovens foram, em geral, paleozoicas (Cambriano ao Eocarbonífero), o que se mostrou uma informação pouco conclusiva, exceto no caso dos arenitos da Formação Sambaíba. Nesse caso, a idade máxima é balizada pela ocorrência de um zircão com idade de 235 ± 5 Ma, enquanto o final da sedimentação estaria limitado pela colocação dos derrames basálticos da Formação Mosquito em c. 200 Ma (Merle *et al.*, 2011), assim restringindo a deposição dos arenitos eólicos entre o Mesotriássico e o limite Triássico-Jurássico, no intervalo Ladiniano-Rhaetiano.

conclusão e recomendações

A intensa superposição de diversos processos geológicos nas rochas paleozoicas-triássicas da Bacia do Parnaíba modificou, muito provavelmente, as assinaturas de proveniência sedimentar. Como consequência, o estudo de minerais pesados mostrou-se pouco sensível como sinalizador de proveniência. O maior volume mineralógico obtido foi zircão, turmalina e rutilo, ainda que quantidades menores de estauroлита, cianita, silimanita e granada tenham sido detectadas, sugerindo a participação efetiva das sequências supracrustais pré-cambrianas das províncias Borborema e Tocantins como áreas-fontes.

As idades de zircão detrítico mostram que a maior contribuição provém de áreas com idades no intervalo Riáciano-Orosiriano, Esteniano-Toniano e Ediacarano. De certa forma, a homogeneidade observada entre os espectros de proveniência gerados para cada unidade litoestratigráfica da bacia tampouco permitiu distingui-las, à exceção do padrão definido pelos arenitos da Formação Sambaíba com uma população dominante no Ediacarano. A relevante presença de zircões com idades atribuídas ao evento Cariris Velhos (1.000-920 Ma) aponta para

fontes hoje reconhecidas somente nos domínios central e meridional da Província Borborema, sugerindo que essa região deve ter permanecido soerguida e funcionando como paleorrelevo potencialmente favorável para erosão e transporte de detritos durante todo o Paleozoico. Ao mesmo tempo, funcionaria como barreira geográfica a sul-sudeste da Bacia do Parnaíba. Essa hipótese entra em conflito, pelo menos em parte, com modelos que pressupõem extensão para sul-leste dos limites atuais da bacia em uma grande área dominada por sedimentação paleozoica, cujo registro está preservado nas bacias interiores do Nordeste brasileiro. Esta hipótese parte da premissa de que os arenitos que caracterizam, por exemplo, as formações Mauriti (Araípe) e Tacaratu (Tucano) seriam correlacionáveis aos arenitos do Grupo Serra Grande, com base exclusivamente em similaridades litológicas (Mesner e Wooldridge, 1964; Aguiar, 1971; Caputo e Lima, 1984; Cunha, 1986; Della Fávera, 1990). Em concordância com as recomendações de Arai (2006), espera-se que os dados deste trabalho sejam aproveitados em novas discussões que enfoquem modelos de reconstrução paleogeográfica para a Bacia do Parnaíba e correlações laterais com outras bacias, obviamente associados a outras ferramentas metodológicas, tal como a bioestratigrafia.

Alternativamente, as fontes dos zircões estonianos-tonianos poderiam ser as sequências neoproterozoicas depositadas no final do Ediacarano. É crescente o número de publicações que apontam a presença significativa dessa população em rochas metassedimentares pelíticas da Província Borborema (Caxito *et al.*, 2013; Hollanda *et al.*, 2015), o que sugere que os zircões encontrados nas sucessões paleozoicas da Bacia do Parnaíba poderiam ser oriundos do retrabalhamento sedimentar das sucessões neoproterozoicas e não propriamente erodidos diretamente de suas fontes primárias.

Finalmente, os dados geocronológicos aqui apresentados demonstram a necessidade de uma abordagem metodológica mais direta para discutir a importância de processos de reciclagem interna da Bacia do Parnaíba. A repetição dos espectros de idades detríticas e das assembleias de minerais pesados sugere que a reciclagem pode ter sido um mecanismo efetivo (subordinado ou não) durante o preenchimento da bacia, mas infelizmente não permite quantificá-lo de maneira assertiva. Nesse contexto, a literatura tem mostrado que o método de Sensibilidade de Luminescência Ópticamente

Induzida (em inglês referido pelo acrônimo OSL) fornece indicadores quantitativos sobre o tempo de estocagem de grãos de quartzo em ambientes sedimentares, principalmente fluviais (Moska e Murray, 2006; Pietsch *et al.*, 2008). Esse parâmetro é estimado com base no incremento da sensibilidade do quartzo (também feldspato) gerada a partir da exposição à irradiação solar durante o ciclo sedimentar, na relação de que quanto maior a sensibilidade medida, maior o grau de retrabalhamento sedimentar. O método tem sido fortemente utilizado em sedimentos recentes para obter informações sobre o tamanho de bacias de drenagem, distância entre bacia e área-fonte e a dinâmica sedimentar (Sawakuchi *et al.*, 2011), e vem sendo testado com sucesso em rochas sedimentares antigas (Nóbrega, 2011).

referências bibliográficas

AGUIAR, G. A. Revisão Geológica da Bacia Paleozóica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1971. v. 3, p. 113-122.

ANGELIM, L. A. A.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, J. R. C.; WANDERLEY, A. A.; FORGIARINI, L. L.; MEDEIROS, M. F., 2014. Folha SB-24-Jaguaribe. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. N.; VIDOTTI, R. M.; RAMOS, M. A. B. (ed.); JESUS, J. D. A. (Ed.). **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**. Brasília: CPRM, 2004. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/4978>>. Acesso em: 14 jun. 2013

ARAI, M. Revisão estratigráfica do Cretáceo Inferior das bacias interiores do nordeste do Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 25, n.1, p. 7-15, 2006.

ARAÚJO, C. E. G.; CORDANI, U. G.; BASEI, M. A. S.; CASTRO, N. A.; SATO, K.; SPROESSER, W. M. U-Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreau Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for along-lived Neoproterozoic active continental margin. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 206-207, p. 36-51, 2012.

- CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984. v. 2, p. 740-752.
- CAXITO, F. A.; DANTAS, E. L.; STEVENSON, R.; UHLEIN, A. Detrital zircon (U-Pb) and Sm-Nd isotope studies of the provenance and tectonic setting of basins related to collisional orogens: the case of the Rio Preto fold belt on the northwest São Francisco Craton margin, NE Brazil. **Gondwana Research**, Osaka, v. 26, n. 2, p. 741-754, Sept. 2013.
- CUNHA, F. M. B. **Evolução paleozoica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico**. 1986. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geologia)– Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.
- DELLA FÁVERA, J. C. **Tempestitos da Bacia do Parnaíba**. 1990. Tese (Doutorado em Geociências)– Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990. 2v.
- GEHRELS, G. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: GEHRELS, G; BUSBY, C.; AZOR, A. (Ed.). **Tectonics of Sedimentary Basins: recent Advances**. Chichester: Willey-Blackwell, 2012. p. 47-62.
- GÓES, A.M.O.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. **Bolletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-67, jan./mar. 1994.
- GRAHN, Y.; MELO, J. H. G.; STEEMANS, P. Integrated chitinozoan and miospore zonation of the Serra Grande Group (Silurian-Lower Devonian), Parnaíba Basin, Northeast Brazil. **Revista Española de Micropaleontología**, Madrid, v. 37, n. 2, p. 183-204, 2005.
- GUIMARÃES, I. P.; VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; BITTAR, S. M. B.; DA SILVA FILHO, A. F.; ARMSTRONG, R. U-Pb zircon ages of orthogneisses and supracrustal rocks of the Cariris Velhos belt: Onset of Neoproterozoic rifting in the Borborema Province, NE Brazil. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 192-195, p. 52-77, jan. 2012.
- HAUGHTON, P. D. W.; TOOD, S. P.; MORTON, A. C. Sedimentary provenance studies. In: MORTON, A. C.; TOOD, S. P.; HAUGHTON, P. D. W. (Ed.). **Developments in Sedimentary provenance studies**. London: The Geological Society, 1991. p. 01-11. (Special Publications, 57).
- HOLLANDA, M. H. B. M.; ARCHANJO, C. J.; BAUTISTA, J. R.; SOUZA, L. C. Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira basins (Borborema Province, NE Brazil): evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 258, p. 186-207, Mar. 2015.
- JACKSON, S. E.; PEARSON, N. J.; GRIFFIN, W. L.; BELOUSOVA, E. A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 211, n. 1-2, p. 47-69, Nov. 2004.
- LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética - relatório final - etapa 3**. Recife: DNPM/CPRM, 1978. v.1.
- LIMA, E. A. M.; TORRE, A. G.; WANDERLEY, A. A.; BRITO, A. L. F.; VIEIRA, A. T.; PEREIRA, A. C. S.; MEDINA, A. I. M.; BARBOSA, A. J.; VASCONCELOS, A. M.; AGUIAR, C. J. B.; JAEGGER, C. R. S.; AMARAL, C. A.; SATO, E. Y.; OLIVEIRA E SILVA, E. H. R.; FORTES, F. P.; BENEVIDES, H. C.; LEITE, J. F.; MORAES, J. F. S.; RIBEIRO, J. A.; NESI, J. R.; ANGELIM, L. A. A.; CALHEIROS, M. A. V. **Projeto Scheelita – Seridó: relatório final e mapas**. Recife: DNPM/CPRM, 1980.
- MANGUE, M.A.; MAURER, H.F.W. **Heavy mineral in colour**. London: Chapman & Hall, 1992.147 p.
- MARULANDA, C. O. **Estudo de proveniência em sequências supracrustais neoproterozoicas da Zona Transversal, Província Borborema**. 2013. 102 f. Tese (Mestrado)– Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous coastal basins North Brazil. **Bulletin Association of Petroleum Geologists**, Tulsa, v. 48, n. 9, p. 1476-1512, 1964.
- MERLE, R.; MARZOLI, A.; BERTRAND, H.; REISBERG, L.; VERATI, C.; ZIMMERMANN, C.; CHIARADIA, M.;

- BELLIENI, G.; ERNESTO, M. 40Ar/39Ar ages and Sr-Nd-Pb-Os geochemistry of CAMP tholeiites from Western Maranhão basin (NE Brazil). **Lithos**, Amsterdam, v. 122, n. 3-4, p. 137-151, Mar. 2011.
- MORTON, A. C.; HALLSWORTH, C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 90, n. 3, p. 241-256, May 1994.
- MORTON, A. C.; WHITHAM, A. G.; FANNING, C. M. Provenance of Late Cretaceous-Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 182, n. 1-4, p. 3-28, Dec. 2005.
- MOSKA, P.; MURRAY, A. S. Stability of the quartz fast-component in insensitive samples. **Radiation Measurements**, Oxford, v.41, n. 7-8, p. 878-885, Aug./Sept. 2006.
- NEVES, S. P.; BRUGUIER, O.; SILVA, J. M. R.; BOSCH, D.; ALCANTARA, V. C.; LIMA, C. M. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis? **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 175, n. 1-4, p. 187-205, Dec. 2009.
- NELSON, D. R. An assessment of the determination of depositional ages for Precambrian clastic sedimentary rocks by U-Pb dating of detrital zircons. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 141-142, p. 37-60, June 2001.
- NEMCHIN, A. A.; CAWOOD, P. A. Discordance of the U-Pb system in detrital zircons: implication for provenance studies of sedimentary rocks. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 182, n. 1-4, p. 143-162, Dec. 2005.
- NÓBREGA, J. E. S. **Proveniência sedimentar do Grupo Guaritas, Eocambriano da Bacia do Camaquã (RS)**. 2011. 47 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica)– Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- OLIVEIRA, E. P.; TOTEU, S. F.; ARAÚJO, M. N. C.; CARVALHO, M. J.; NASCIMENTO, R. S.; BUENO, J. F.; MCNAUGHTON, N.; BASILICI, G. Geologic correlation between the Neoproterozoic Sergipano belt (NE Brazil) and the Yaoundé belt (Cameroon, Africa). **Journal of African Earth Sciences**, Oxford, v. 44, n.4-5, p. 470-478, Apr. 2006.
- PEDREIRA DA SILVA, A. J.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. Bacias Sedimentares Paleozoicas e Mesocenoicas Interiores. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Ed.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**: texto, mapas & SIG. Brasília: CPRM, 2003. p. 55-85.
- PIMENTEL, M. M.; RODRIGUES, J. B.; DELLA GIUSTINA, M. E. S.; JUNGES, S. L.; MATTEINI, M.; ARMSTRONG, R. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb sedimentary provenance data: a review. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 345-357, Apr. 2011.
- PIETSCH, T. J.; OLLEY, J. M.; NANSON, G. C. Fluvial transport as a natural luminescence sensitiser of quartz. **Quaternary Geochronology**, Amsterdam, v. 3, n. 4, p. 365-376, Nov. 2008.
- PIUZANA, D.; PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A.; ARMSTRONG, R. A. SHRIMP U-Pb and Sm-Nd data for the Araxá Group and associated magmatic rocks: constraints for the age of sedimentation and geodynamic context of the southern Brasília Belt, central Brazil. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 125, p. 139-160, 2003.
- RODRIGUES, J. B.; PIMENTEL, M. M.; BUHN, B.; MATTEINI, M.; DARDENNE, M. A.; ALVARENGA, C.J.S.; ARMSTRONG, R. A. Provenance of the Vazante Group: New U-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. **Gondwana Research**, Osaka, v. 21, n. 2-3, p. 439-450, Mar. 2012.
- RODRIGUES, J. B.; PIMENTEL, M. M.; DARDENNE, M. A.; ARMSTRONG, R. A. Age, provenance and tectonic setting of the Canastra and Ibiá groups (Brasília belt, Brazil): implications for the age of a Neoproterozoic glacial event in central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 29, n. 2, p. 512-521, Mar. 2010.
- SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. **Paleontologia das Bacias do Parnaíba**: Grajaú e São Luiz. Rio de Janeiro: CPRM, 2009. 215 p.

SAWAKUCHI, A. O.; DEWITT, R.; FALEIROS, F. M. Correlation between thermoluminescence sensitivity and crystallization temperatures of quartz: Potential application in geothermometry. **Radiation Measurements**, Oxford, v. 46, n. 1, p. 51-58, Jan. 2011.

SIQUEIRA, R.; HOLLANDA, M. H. B. M.; BASEI, M. A. S. A novel approach to (LA-ICP-MS acquired) U-Th-Pb data processing. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 9, 2014, São Paulo. **Program and Abstracts...** São Paulo: Centro de Pesquisas Geocronológicas, 2014. v. 1, p. 306.

VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A. M.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253-263, maio/nov. 2007.

expanded abstract

This article presents the results of the “Sedimentary Provenance in the Parnaíba Basin based on Sedimentology and Geochronology Techniques” project, which was signed between Petrobras and the São Paulo University, according to the R&D Program of the Sedimentology and Stratigraphy Study Network/Cenpes. The project aims to determine the provenance signature of the Paleozoic-Triassic section of the Parnaíba Basin, using U-Pb dating of detrital zircon, heavy mineral analysis and petrographic and paleocurrent studies of the outcrops exposed in the northeastern and central-western parts of the basin. The information obtained from petrographic and heavy mineral analyses show that sandstones were strongly affected by intrastratal dissolution, paleopedogenesis and internal recycling. The superposition of these processes highly obliterated the sedimentary provenance signatures, making a conclusive analysis using conventional methods difficult. The identification of heavy minerals, based on the analysis of eighty samples of sandstones collected in the two sectors of the basin lacked the sensitivity to detect the provenance patterns, and did not help to determine stratigraphic differentiation. After 24,000 grains were quantified, it was observed that zircon, tourmaline and rutile are the principal minerals in all samples in both sectors, with no clear stratigraphic distinction and with insufficient precision to indicate more specific sources. Low percentages of staurolite, kyanite, sillimanite, scheelite, epidote and garnet, as well as the occurrence of schist clasts in thin sections, indicate that the Precambrian supracrustal rocks, exposed in the domains of the Borborema and Tocantins provinces, were probable sources of detritus to the basin filling.

However, when the average ZTR and RZi indexes for each formation of the central-western portion were evaluated, it was observed that there was a progressive increase in the volume of zircon from the older formations to the newer ones, which was accompanied by an increase in the degree of roundness of the zircon grains. This pattern is more expressive in the Aeolian facies of the Piauí Formation and significantly expressive in the Motuca and Sambaíba sandstones,

suggesting that internal recycling processes were relevant during the final stage of sedimentation in the basin.

The same sandstone samples were analyzed using U-Pb geochronology of detrital zircons. Approximately 3,600 analytical data were obtained, and out of this total 3,330 provided concordant ages, which were used as provenance proxy. Regarding the morphology, detrital grains have prismatic shapes, often with primary etching and preserved bi-pyramidal terminations; abraded grains are common, with shapes varying from rounded (particularly in the Aeolian sandstones of the Sambaíba Formation) to subrounded, indicating strong reworking by transportation.

When the age spectra of detrital zircons are considered, the interpretations of sources are not conclusive. First, the joint analysis shows that all Paleozoic units, including the Motuca Formation, have two main peaks in the Neoproterozoic: Stenian-Tonian (1,200-850 Ma) and Ediacaran (630-542 Ma) and a population with important ages distributed in the Paleoproterozoic, between the Rhyacian and Statherian. The detailed analysis shows that the differences are mainly related to the percentage proportion of Neo- and Paleoproterozoic detrital zircons. For example, the Serra Grande Group has 27% of Ediacaran zircons in the entire analyzed set, which is significantly greater than the average of the other units, approximately 18%. However, for this unit, Stenian-Tonian detrital zircons represent only 16%, whereas for the units of the Canindé and Balsas Groups, the percentage ranges between 22% and 28%. It is noteworthy that the Aeolian sandstones of the Sambaíba Formation share certain similarities with the volumetric proportion of Neoproterozoic zircons present in the fluvial to marine sandstones of the Serra Grande Group. Both units have the same percentage of Ediacaran ages (~27%), but the Sambaíba Aeolian sandstones have a greater volume of Cryogenian ages (21%) than the Serra Grande sandstones (10%), showing an inverse behavior for the Stenian-Tonian ages, respectively 10% and 16%. Considering the repetition of the detrital age spectra in the entire Paleozoic section, these differences may reflect the effectiveness of the erosion agents and sediment transportation, affecting the variable participation of the potentially available source-areas. Moreover, the homogeneity of the spectra suggests that intra-basinal

recycling processes might have been relevant, mainly during the Aeolian sedimentation of the Mesozoic sandstones of the Sambaíba Formation.

Nevertheless, the remarkably higher volume of zircons with ages between 850-630 Ma indicates that Cryogenian primary sources were needed, in view of the fact that this population does not exceed 12% in other stratigraphic units.

The three main populations of detrital zircons characterized in the spectra of the sandstones of the Parnaíba Basin are identified in igneous and metamorphic rocks, which are currently exposed in the Borborema Province and in its African counterpart. Accordingly, examples with Archean and Neoproterozoic ages were observed in the distinct domains of the Tocantins province, whereas a large volume of Archean and Paleoproterozoic rocks with ages comparable to those of detrital zircons found in the sandstones studied here, was found in the Amazonian, São Franciscan and West African cratons. Given that the provenance of detrital zircons is essentially chronological information, and considering the probable Gondwana configuration, any of these areas can be indicated as potential sources. On the other hand, the paleocurrents measured in a large area of the Serra Grande Group and the Cabeças Formation exposed in the eastern border of the basin indicate a direct provenance from the terranes of the Borborema Province; few measurements obtained in the Cabeças sandstones of the western border suggest a greater variation in the paleodrainage flow from SE to NE. It is possible that the sedimentation in this area, although not particularly representative, has been affected by source-areas, such as the Amazonian Craton and the Precambrian terranes of the Tocantins Province.

When detrital ages are evaluated using cumulative curves, the three main populations for each unit are represented by plateaus in 2.1-1.8 Ga, 1,100-950 Ma and 650-500 Ma. The plateaus and the transitions between them are common to all units, confirming the recurrence of sources with the same chronological signature during the Paleozoic and Triassic sedimentation of the Parnaíba Basin. The Cabeças Formation stands out for a less significant percentage of Ediacaran zircons and a high percentage of Paleoproterozoic zircons when compared with others, whereas the cumulative curve of the Sambaíba Formation confirms the prevalence of Ediacaran ages. The curves are

compared with patterns of provenance of the metasedimentary successions of the Borborema and Tocantins provinces, which were formed during the evolution of the Cariris Velhos event, restricted to the central and southern domains of Borborema, and of the Brasiliano Orogeny, which is widespread all over the province. Overall, the sandstones of the Parnaíba Basin have a considerable number of zircons with ages attributed to the Cariris Velhos event (1,000-920 Ma), which indicates sources currently preserved in the central and southern domains of the Borborema Province. This suggests that this region remained uplifted as an area potentially subjected to erosion and transportation of detritus during most of the Paleozoic. At the same time, its paleo-relief acted as a geographic barrier located to the south-southeast of the Parnaíba Basin.

Finally, an additional contribution obtained from the ages of detrital zircons comes from the relationship between the age of the newer zircons found in each unit and the maximum age for the onset of deposition. In all units of the Parnaíba Basin, the newer detrital ages fall, in general, within the Paleozoic (Cambrian to Lower Carboniferous), information that proved to be inconclusive, except for the sandstones of the Sambaíba Formation. In this case, the maximum age is limited by the occurrence of a 235 ± 5 Ma zircon, whereas the end of the sedimentation would be limited by the basaltic lava flows of the Mosquito Formation ca. 200 Ma, therefore restricting the deposition of the eolian sandstones between the Mid-Triassic and the Triassic-Jurassic boundary in the Ladinian-Rhaetian interval. These more recent events were not observed in the basin, but their ages are correlated to the ages of Paleo and Mesozoic tuffs and volcanic rocks found in the Paraná Basin and other equivalents found in other continents.

autores



Maria Helena Bezerra Maia de Hollanda

Universidade de São Paulo (USP)
Instituto de Geociências
Departamento de Mineralogia e
Geotectônica

hollanda@usp.br

Maria Helena Bezerra Maia de Hollanda possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1995), mestrado em Geodinâmica e Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1998) e doutorado em Geologia pela Universidade de Brasília (2002). É professora associada do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, membro permanente do Centro de Pesquisas Geocronológicas (IGc/USP) e do Núcleo de Pesquisa GEO-SEDEX (USP). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em geologia isotópica, atuando principalmente em temas relacionados à evolução crustal de terrenos proterozoicos nas províncias Borborema e Mantiqueira e à evolução petrogenética do manto na Região Nordeste do Brasil.



Ana Maria Góes

Universidade de São Paulo (USP)
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia Sedimentar e
Ambiental

anamgoes@gmail.com

Ana Maria Góes possui graduação em Geologia (1976) pela Universidade de São Paulo (USP), especialização e mestrado (1981) pela Universidade Federal do Pará (UFPA), aperfeiçoamento (1985) pela Universidade de Campinas (Unicamp) e doutorado (1995) e pós-doutorado (2006-2008) pela USP. Professora aposentada do Instituto de Geociências da UFPA colabora em ensino e pesquisa junto ao Instituto de Geociências da USP e é bolsista de produtividade científica do CNPq. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em sedimentologia e estratigrafia, atuando principalmente em: análise faciológica e estratigráfica e proveniência sedimentar. Trabalha com os depósitos paleozoicos, cretáceos e cenozoicos das bacias do Parnaíba, São Luís-Grajaú nos estados do Maranhão e Piauí e da Bacia Paraíba no estado homônimo.



Daniela Batista da Silva

Universidade de São Paulo (USP)
Instituto de Geociências

daniela.batista.silva@usp.br

Daniela Batista da Silva é graduanda em Licenciatura em Geociências e Educação Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP). Atua como técnica em metalografia com especialização em preparação de dispositivos para espectrometria de massas *in situ* e microscopia eletrônica de varredura.



Francisco de Assis Negri

Instituto Geológico (IG)
Secretaria do Meio Ambiente do Estado
de São Paulo

negri.francisco@gmail.com

Francisco de Assis Negri possui graduação em Geologia (1989) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), Mestre (1995) e Doutor (2002) em Geociências – Geologia Regional pela Unesp – Campus de Rio Claro (SP), sob a orientação do Prof. Dr. Marcos Aurélio Farias de Oliveira. É pesquisador científico, nível V, do Instituto Geológico do estado de São Paulo, atuando principalmente na área de mapeamento geológico, com ênfase em terrenos de alto grau metamórfico e magmatismo associado.