ASSINATURA ISOTÓPICA Sm-Nd DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO: IMPLICAÇÕES NA CARACTERIZAÇÃO DA PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS DO RIO PARAÍBA DO SUL – SP

HENRIQUE LLACER ROIG¹, AUGUSTO PINHEIRO DE MORAES REGO²,
ELTON LUIZ DANTAS³, PAULO ROBERTO MENESES³, DETLEF HANS GERT WALDE³ &
SIMONE M.L.C GOIA³

Resumo Análises isotópicas Sm-Nd dos sedimentos em suspensão que aportam no reservatório do Funil-RJ foram realizadas objetivando a identificação de suas áreas fonte. As assinaturas isotópicas Sm-Nd apresentaram pequena variação indicando a homogeneização dos sedimentos. Apesar desta homogeneização, nota-se uma variação na distribuição espacial das características isotópicas Sm-Nd entre as sub-bacias. Isto ocorre devido a diferenças nas assinaturas isotópicas das rochas fonte e da variação da área de ocorrência das litologias em cada sub-bacia. As sub-bacias Guaratinguetá e Piquete possuem os maiores valores de T_{DM} (2,11 e 2,13 Ga respectivamente) devido à erosão das litologias do Complexo Mantiqueira (T_{DM} médio de 2,9 Ga) e do Grupo Andrelândia (T_{DM} 2,1 Ga). As sub-bacias Buquira (T_{DM} 1,76 Ga) e Matos (T_{DM} 1,78 Ga) são influenciadas pelos biotita-gnaisses do Complexo Embu (1,56-1,67 Ga). Os paragneisses do Complexo Embu (T_{DM} 1,94 Ga) recobrem 77% da área da sub-bacia Una, cujo T_{DM} é de 1,96 Ga. As sub-bacias Parateí (T_{DM} 1,85 Ga) e Divisa (T_{DM} 1,85 Ga) têm nos sedimentos da Bacia de Taubaté (T_{DM} 1,9 Ga) seus principais contribuintes. O balanço de massa obtido para $\epsilon_{Nd(0)}$ e T_{DM} mostra uma boa correlação entre a descarga dos sedimentos em suspensão e a média ponderada das rochas existentes em cada sub-bacia. Os valores médios de $R_{sed-rocha}$ de 1,08 ($\epsilon_{Nd(0)}$) e 1,02 (T_{DM}) evidenciam, para o período analisado, a existência de um equilíbrio dinâmico (*steady state*) entre os processos intempericos e de erosão/transporte para este seguimento da bacia do rio Paraíba do Sul.

Palavras-chave: Proveniência de Sedimentos, isótopos Sm-Nd; sedimentos em suspensão; balanço de massa, Bacia do Rio Paraíba do Sul

Abstract *Sm-Nd ISOTOPIC SYSTEMATICS OF LOAD SUSPENDED MATERIAL: IMPLICATION OF PROVENANCE CHARACTERISTIC OF SEDIMENTS OF THE RIO PARAÍBA DO SUL BASIN, SOUTHEASTERN BRAZIL.* In order to identify the source area for the sediments in suspension that contribute to the Funil RJ reservoir, Sm-Nd isotopic signatures indicates the homogenization of the sediments. Despite this homogeneity, a variation in the space distribution of the Sm-Nd isotopic characteristics is noticed among the sub-basins. This is due to differences in the isotopic signatures of the source rocks and to the variation in the occurrence area of each lithology in each sub-basin. The Guaratinguetá and Piquete sub-basin show the highest T_{DM} (2.11 e 2.13 Ga respectively) due to the erosion of the Mantiqueira Complex (average T_{DM} 2.9 Ga) and of the Andrelândia Group (T_{DM} 2.1 Ga) lithologies. The sub-basin Buquira (T_{DM} 1.76 Ga) and Matos (T_{DM} 1.78 Ga) are influenced by Complexo Embu's biotite gneiss (1.56 – 1.67 Ga). Embu's Complex paragneiss (T_{DM} 1.94 Ga) cover 77% of the area of the Una sub-basin, whose T_{DM} 1.96 Ga. The Parateí (T_{DM} 1.85 Ga) and Divisa (T_{DM} 1.85 Ga) sub-basin have as their principal source, the sedimentary rocks of the Taubaté Basin (T_{DM} 1.9 Ga). The mass balance obtained from $\epsilon_{Nd(0)}$ and T_{DM} shows a good correlation between the discharge on the suspended sediments and the estimated average of the existent rocks in each sub-basin. The average values of $R_{sed-rock}$ are 1.08 ($\epsilon_{Nd(0)}$) and 1.02 (T_{DM}) suggesting, for the analyzed period, the existence of a steady-state dynamic balance between the weathering and erosion/transportation processes in region of the Paraíba do Sul river basin.

Keywords: Provenance of sediments, Sm-Nd isotopic; suspended sediments; mass balance, Paraíba do Sul Basin

INTRODUÇÃO A determinação da proveniência de sedimentos tem sido tradicionalmente estabelecida a partir de estudos petrográficos, de direções de paleocorrentes e de morfologia dos grãos. Estes estudos têm auxiliado no entendimento da formação das paleo-bacias sedimentares e na compreensão da dinâmica dos processos de erosão e de transporte de sedimentos recentes (Bengtsson & Stevens 1998). Nas últimas décadas, novas técnicas balizadas por princípios geoquímicos (Négre et al. 1993, Roy et al. 1999) e isotópicos (Allègre et al. 1996, Weldeab et al. 2002) têm sido empregadas nos estudos de proveniência de sedimentos.

A utilização da geoquímica isotópica Sm-Nd na análise da

proveniência de sedimentos recentes iniciou no final da década de 60 com o principal objetivo de estimar o fluxo de material derivado dos continentes para os oceanos (Bayon et al. 2002). Estudos voltados para a análise de sedimentos fluviais são bem mais recentes (Goldstein et al. 1984, Frost et al. 1986, Martin & McCulloch 1999).

Uma característica marcante dos estudos de proveniência existentes na literatura é a análise de áreas que apresentem fontes contrastantes, normalmente compreendendo um componente mantélico juvenil e um embasamento siálico derivado de fontes continentais retrabalhadas. Como exemplo pode-se citar os estudos

1 - DGAP/FGEL, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Av. São Francisco Xavier 524, 4006-A, Maracanã, CEP 20550-900, Rio de Janeiro - RJ, Brasil – roig@uerj.br

2 - UN-SEAL/ATEX/ AAG. Rua do Acre n 2504 - Siqueira Campos - Aracaju-SE. CEP - 49080-010

3 - IG - Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro CEP 70910-900 Brasília - DF - Brasil

da Bacia Amazônica (Basu *et al.* 1990), do prisma de acreção de Barbados (Parra *et al.* 1997), das bacias dos contrafortes dos Himalaias (Clift *et al.* 2002) e do Mediterrâneo (Weldeab *et al.* 2002). São poucos os estudos desenvolvidos em bacias hidrográficas de médio a pequeno porte (Tricca *et al.* 1999), onde os trabalhos existentes utilizam-se de geoquímica isotópica combinada à geoquímica convencional (Elementos Terras Raras - ETR e traços). Normalmente essas bacias apresentam fontes com pouco contraste na assinatura isotópica Sm-Nd, exigindo estudos mais aprofundados onde técnicas de balanço de massa podem ser empregadas para identificar os membros finais de cada fonte, como proposto por Louvat & Allegre (1997) e Andresen & Laajoki (2003). Segundo Goldstein *et al.* (1984) mais de 95% da carga de sedimentos dos grandes rios tem um tempo de residência crustal de $1,7 \pm 0,35$ Ga, o que reflete o baixo contraste observado nos estudos das bacias hidrográficas.

Considerando o exposto, a proposta deste trabalho é verificar a eficiência da aplicação da sistemática Sm-Nd no estudo de transporte de sedimentos e na identificação das áreas fonte em bacias de médio a pequeno porte. A identificação das áreas fonte e a sua contribuição para a carga de sedimento transportado pelos rios adquiriram uma grande importância nos últimos anos, devido aos problemas existentes com o armazenamento das águas pelos reservatórios, o que afeta a sua qualidade e a geração de energia elétrica (Carvalho *et al.* 2000). O Brasil, país com mais de 70% da

energia elétrica provida por hidrelétricas (ANEEL 2005), possui muito dos seus reservatórios total ou parcialmente assoreados, como o exemplo da área deste estudo, que abrange parte da bacia do rio Paraíba do Sul (RPS) localizada à montante do Reservatório de Funil, perfazendo uma área de 13.500 km² dos 57.000 km² de toda a bacia (Fig. 1). Esta porção da bacia abriga, além do reservatório do funil, as barragens de Paraibuna/Paraitinga, Santa Branca, Jaguarí.

Dentro deste contexto os objetivos deste estudo são: (1) caracterizar a assinatura dos sedimentos em suspensão drenados e identificar a sua distribuição espacial; (2) compará-los com a assinatura isotópica das rochas fontes, com o propósito de definir as áreas fonte dos sedimentos; e (3) determinar a influência de cada sub-bacia no fluxo de sedimentos.

SISTEMÁTICA Sm-Nd EM SEDIMENTOS RECENTES E DE SUSPENSÃO A determinação da proveniência dos sedimentos balizada na sistemática Sm-Nd pode ser estabelecida comparando-se as assinaturas isotópicas dos sedimentos atuais com as das rochas das áreas fonte (O'Nions *et al.* 1983, Nelson & DePaolo 1988). Isso é possível devido às características dos isótopos Sm e Nd, tais como:

1. A longa meia vida do ¹⁴⁷Sm permite que a razão ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd permaneça constante durante o período de atuação dos processos geológicos;

Figura 1 – Localização da área de estudo - bacia do rio Paraíba do Sul a montante do reservatório do Funil –RJ.

2. As razões isotópicas Sm/Nd não apresentarem significativo fracionamento durante os processos supérgenos (Dickin 1995).

3. Baixa solubilidade do Sm e do Nd. Estes elementos são essencialmente transportados pelo material particulado, onde a concentração na fase dissolvida é controlada pelo pH das águas (Tricca *et al.* 1999). Normalmente, a presença de Sm e Nd na fase dissolvida está associada à existência de colóide que passa pelo filtro durante a etapa de separação do particulado da fase dissolvida (Allègre *et al.* 1996). Águas de rios contêm em média 8 ppb de Sm e 40 ppb de Nd e as águas do mar 0,8 e 4 ppb respectivamente. Em contrapartida, o valor médio na crosta continental é de 6 ppm para Sm e 30 ppm para o Nd (Mearns 1992, Dickin 1995) o qual é o mesmo para os sedimentos em suspensão. Deste modo, considera-se que a carga de Sm-Nd é determinada analisando-se o material particulado.

4. As frações argila/silte e areia de um mesmo sedimento apresentam razões isotópicas similares (Dickin 1995). Segundo Louvat & Allègre (1997) a variabilidade da composição dos ETR nos particulados em suspensão e no material de fundo é da mesma ordem de magnitude, com razão particulado/fundo (P/S) de ± 1 , com exceção do Európio. Quando a concentração do Sm ou do Nd diverge muito deste valor é provável que a entrada de material pobre em ETR, como o quartzo, ou de matéria orgânica dilua a sua concentração (Négre *et al.* 1993). Vários trabalhos que utilizam balanço de massa com dados geoquímicos consideram a relação P/S sendo aproximadamente igual a 1 e normalmente desconsideram a carga de fundo (Gaillardet *et al.* 1995, 1997).

Considerando o exposto podemos admitir que os sedimentos representam a mistura do produto de alteração das rochas que ocorrem na bacia de drenagem. Assim, a razão isotópica também representará uma mistura destas fontes. O valor da razão isotópica dos sedimentos será mais próximo do valor da unidade geológica cuja contribuição no aporte de sedimentos seja mais significativa (Mearns 1992) como demonstrado na figura 2.

AMBIENTE GEOLÓGICO O arcabouço geológico da bacia do Rio Paraíba do Sul (RPS) está inserido na Província Mantiqueira

(Almeida *et al.* 1981), mais precisamente na porção central da Faixa Ribeira, cuja evolução está associada a uma história diacrônica ocorrida durante o Brasiliano/Pan Africano (Trouw *et al.* 2000).

A Faixa Ribeira é descrita como uma superposição de escamas crustais de direção NE/SW com vergência para NW e metamorfismo de pressão intermediária. As atividades termo-tectono-magmáticas relacionadas à Faixa Ribeira ocorreram entre 700 e 480 Ma, com auge metamórfico entre 595-565 Ma, ao qual associa-se o magmatismo sin-tectônico. Este arcabouço foi recortado por zonas de cisalhamento transcorrentes tardias onde alojaram-se os corpos magmáticos tardi-tectônicos (540-520 Ma) e pós-tectônicos (520-480 Ma, Heilbron *et al.* 1998).

Dentro deste ambiente, a bacia do RPS abrange as seguintes unidades (Fig. 3):

- a) O embasamento, que inclui as rochas originadas no Arqueano e no Paleoproterozóico (com idades superiores a 1,8 Ga);
- b) As unidades metassedimentares e metavulcano-sedimentares neoproterozóicas deformadas (e rochas com possível idade mesoproterozóica);
- c) Os granitóides neoproterozóicos;
- d) Os maciços Alcalinos de Itatiaia e Passa Quatro;
- e) Os sedimentos terciários (Bacia de Taubaté e Resende).

Embasamento paleoproterozóico-arqueano As rochas do embasamento, correlacionadas ao Complexo Mantiqueira (Roig *et al.* 2004), ocorrem na forma de lentes alongadas de direção NE-SW interdigitadas tectonicamente com as litologias do Complexo Embú, ou ao longo do contato entre os domínios Andrelândia e Embu (figs. 3 e 4). Em termos litológicos o embasamento é constituído predominantemente por hornblenda-biotita gnaisses, freqüentemente migmatizados, com composição tonalítica e granítica. A assinatura isotópica Sm-Nd é caracterizada por uma distribuição das idades modelo T_{DM} entre 2,6 e 3,4, com um caráter bimodal (3,29-3,18 Ga e 2,9-2,6 Ga). O valor do $\epsilon_{Nd(0)}$ destas rochas varia de -16,4 a -35,6.

Supracrustais neoproterozóicas As supracrustais podem ser

Figura 2 – Desenho esquemático demonstrando o princípio do uso da assinatura isotópica Sm-Nd nos estudos de proveniência. Os valores de T_{DM} representam a mistura dos afluentes. No exemplo proposto (Mearns 1992), parte da área “fonte” dos sedimentos tem idade paleozóica, porém com assinaturas isotópicas arqueanas (> 3.0 Ga).

Figura 3 – Mapa geológico da Bacia do rio Paraíba do Sul. Valores de T_{DM} das rochas extraídos de Sato (1998), Ragatky (1998), Braga (2001), Fetter et al. 2003 e Roig et al. (submetido)

Figura 4 – Moledo Digital de terreno - MDT (a) e Mapa geológico sobre o MDT (b). Observa-se quatro compartimentos geomorfológicos: (1) planalto da Mantiqueira definido por morros altos com cristas de topos aguçados e convexos - Grupo Andréia; (2) relevo escarpado da Serra da Mantiqueira, com morros altos de topos aguçados e convexos - Complexo Mantiqueira e o Grupo Andréia; (3) planície e relevos suaves ondulados com topos planos - Coberturas sedimentares; e (4) relevos ondulados - granitóides e o Complexo Embu.

agrupadas nas seguintes unidades geológicas: Grupos Andrêlândia e São Roque e Complexos Embu, Costeiro e Piracaia (Fig. 3).

O Grupo Andrêlândia ocupa a região de relevo escarpado formado pela Serra da Mantiqueira e o planalto sobrejacente a norte (fig.4). É delimitado ao sul pelas zonas de cisalhamento de Jundiuvira/Pinheiros-Rio Preto que o separa do Complexo Embu. É constituído por (granada)-biotita-gnaisses bandados e por hornblenda gnaisses tonalíticos a granodioríticos, frequentemente migmatizados e milonitizados. Intercalações centimétricas a métricas de quartzo micaxistos, quartzitos, rochas calciossilicáticas e mármore podem ocorrer nos (granada)-biotita gnaisses. Tem idades modelos (T_{DM}) entre 2,0 a 2,3 Ga, indicando derivação de uma fonte paleoproterozóica, com valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ entre -19,27 e -24,35.

O Complexo Piracaia ocorre na extremidade NW da área sendo representado por hornblenda gnaisses bandados, migmatíticos, paragneisses e granulitos. É separado do Grupo São Roque pela zona de cisalhamento Jundiuvira. A assinatura isotópica Sm-Nd é marcada por valores de T_{DM} entre 1,54 e 1,94 e de $\epsilon_{Nd(0)}$ entre -12,2 e -21.

O Grupo São Roque/Serra do Itaberaba ocorre na forma de uma cunha limitada a norte e a sul pelas zonas de cisalhamento de Jundiuvira e Buquirinha respectivamente. O Grupo São Roque é constituído por quartzitos, (sillimanita-garnada)-biotita xistos, granada xistos e metavulcânicas básicas a intermediárias, já o Serra do Itaberaba é formado por metaritimitos, siltitos e metabasitos (Juliani *et al.* 2000). Diferentemente das outras unidades, o Grupo São Roque apresenta uma distribuição mais ampla em relação aos valores de T_{DM} (1,86 a 2,86 Ga), enquanto que os valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ apresentam uma pequena variação entre -20,8 e -22,6.

O Complexo Embú está alojado entre as zonas de cisalhamento Buquirinha/Pinheiro-Rio Preto e Cubatão-Paraíba do Sul, servindo

de substrato para as bacias sedimentares de Taubaté e Resende. Este complexo apresenta uma grande diversidade litológica, frequentemente migmatizada e/ou milonitizada, constituído predominantemente por (hornblenda)-biotita gnaisses, (sillimanita)-granada-biotita gnaisses (kinzigitos), migmatitos e xistos quartzofeldspáticos com intercalações de quartzitos, calciossilicáticas e metabásicas. As idades modelos (T_{DM}) variam entre 1,57 e 1,95 Ga, indicando uma fonte meso a paleoproterozóica, com valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ de -13,8 a 21,3.

O Complexo Costeiro ocorre no extremo sul da área, limitado a norte pela zona de cisalhamento de Cubatão-Paraíba separando-o do Complexo Embú. Dois conjuntos litológicos ocorrem neste complexo, os biotita granito-gnaisses e migmatitos, e os paragneisses com intercalações de xistos e quartzitos impuros. Estas litologias têm idade modelo (T_{DM}) entre 1,27 e 1,42 Ga, e valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ entre -12,7 e -14,2.

Granitóides Os granitóides intrusivos neoproterozóicos, em geral, apresentam forma alongada (NE-SW) e uma nítida foliação tectônica, podendo ser do tipo S ou I (Morais *et al.* 1999, Pereira 2001). Os granitóides do tipo S tem composição predominantemente granítica a granodiorítica, normalmente a duas micas, com textura inequigranulares a porfíricos (Morais *et al.* 1999, Pereira 2001). Os granitóides tipo I são representados por (hornblenda)-biotita granitóides, de composição granítica a tonalítica. A assinatura isotópica destas rochas é caracterizada por idade modelo (T_{DM}) entre 1,4 e 2,2 Ga e valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ entre -9,5 e -20,8. Apesar desta ampla variação nas assinaturas isotópicas não é possível separá-los por unidade geológica na escala de trabalho.

Magmatismo alcalino mesozóico-cenozóico Os principais representantes do magmatismo alcalino meso-cenozóico são os

Figura 5 – Mapa das sub-bacias amostradas com os valores de T_{DM} dos sedimentos em suspensão

maciços de Itatiaia e Passa Quatro, localizados na parte NE da área de estudo (Fig. 3). Estes maciços formam corpos contíguos, petrologicamente similares, constituídos predominantemente por nefelina-sienitos com núcleos de alcalissienitos e brechas magmáticas (Trouw *et al.* 2003). Diques subverticais com direção preferencial NE-SW constituídos por diabásio, traquito e lamprófiros também ocorrem na área.

As características isotópicas destas rochas apresentam valores de T_{DM} em torno de 0,8 Ga e valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ de -6 (Fetter *et al.* 2003) distinguindo-os das unidades mais antigas.

Bacias sedimentares cenozóicas A Bacia de Taubaté ocupa área coincidente com o curso principal do RPS, entre as cidades de Jacareí e Cruzeiro (SP), e a Bacia de Resende tem ocorrência restrita à área do reservatório do Funil. Estas bacias desenvolveram-se em ambientes fluviais a fluvio-lacustres e são constituídas por conglomerados, arenitos, siltitos, argilitos, ritimitos, folhelhos e, subordinadamente calcários Riccomini (1989) compartimentou a bacia nas seguintes unidades estratigráficas: Resende, São Paulo; Pindamonhangaba e Tremembé. As idades modelos dos sedimentos variam entre 1,8 a 2,2 Ga e os valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ oscilaram entre -6 e -19,5 (Roig *et al.* 2003, Roig 2005, Sant'Anna *et al.* 2003).

AMOSTRAGEM E PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS A amostragem foi realizada em duas etapas de campo. A primeira (abril de 2001) teve como objetivo testar o funcionamento dos procedimentos de amostragem e análises laboratoriais, descritos em detalhes em Rego (2002). Nesta etapa foram coletadas amostras de sedimentos em suspensão nas estações de Santa Branca (posto-58099000) e Queluz (posto-58235100) da Agência Nacional de Águas (ANA), localizadas no RPS e nos rios Bocaina e Piquete. Após a ratificação do funcionamento dos procedimentos foi realizada uma segunda campanha (setembro/2001), com a coleta de quatorze amostras na porção paulista da bacia do RPS, sendo cinco ao longo do RPS e nove representando as sub-bacias (Fig. 5). A escolha das sub-bacias foi baseada na descarga líquida, na área de drenagem e nas características geológicas. A estação de Jaguarí foi descartada por apresentar baixíssima descarga sólida em suspensão ($< 2 \text{ mg/l}$).

A escolha do período de estiação (setembro) teve como objetivo permitir uma melhor representação do material proveniente da bacia de drenagem e não o material retrabalhado do leito e das margens dos rios.

A amostragem foi realizada seguindo as normas de análise de qualidade de água da Organização Mundial de Meteorologia (WMO 1994). As coletas foram realizadas na porção média da seção do rio a uma profundidade de $\pm 1 \text{ m}$. Na amostragem foram utilizadas garrafas de 1000 ml, previamente lavadas com HCL 10%

e água destilada. As análises isotópicas Sm-Nd das amostras coletadas foram realizadas no Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

Por tratar-se de um procedimento inédito para os laboratórios brasileiros e devido às membranas serem digeridas junto com as amostras foi necessário um pré-processamento objetivando determinar o branco do laboratório, que incluiu a limpeza das membranas e do sistema de filtragem.

A limpeza das membranas seguiu as seguintes etapas: (1) lavagem com ácido nítrico 10% em Savilex® no ultra-som por 10 min com intervalos de 30 min durante no máximo 4 horas. Este período foi capaz de limpar a membrana sem gerar deformações e perda da sua eficiência de filtragem; (2) lavagem com água destilada Nanopure por 10 min; (3) secagem em capelas com fluxo laminar por 24h; (4) Pesagem e armazenamento em placas de petri, previamente lavadas com água régia diluída 1:1 por 48h.

A limpeza do sistema de filtragem seguiu as etapas: (1) lavagem submersa (*subboiling*) dos filtros com HNO_3 10% por 24h; (2) limpeza com água destilada (H_2O Nanopure); (3) lavagem com HCL 6N por 24h; (4) limpeza com água destilada (H_2O Nanopure); (5) secagem em capela por 24h e armazenamento em recipientes limpos e fechados.

A sistemática adotada para a limpeza das membranas de acetato e celulose e dos filtros resultou em valores de “branco” menores que 35 e 120 picogramas de Nd e Sm respectivamente (tabela 1). Os valores foram suficientemente baixos a ponto de permitir que as amostras fossem dissolvidas juntamente com as membranas, evitando a perda do material coletado e a contaminação no processo de separação membrana/sedimento. Nesta etapa foi descartada a utilização das membranas de teflon (teoricamente inertes) em virtude do custo, dos altos valores do branco em comparação as membranas de celulose (Tabela 1) e ao longo período de filtragem, por vezes com mais de 48hs onde a colmatação da membrana era frequente.

Ao término da filtragem a membrana com sedimento é colocada em um Savilex®, limpo e previamente pesado, para secar por 24h na capela. A partir dessa etapa a amostra passa por todo o processo de análise isotópica Sm-Nd padrão do laboratório (Gioia & Pimentel 2000). As análises foram realizadas no espectrômetro de massa modelo Finnigan MAT 262, no modo estático e com arranjo duplo de filamento de Re. A razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ foi normalizada para $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} / 0,7219$ e a constante de decaimento utilizada foi o valor de $6,54 \times 10^{-12}$. A precisão externa da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ é menor que

Tabela 2 – Resultado das assinaturas isotópicas Sm-Nd das amostras dos sedimentos em suspensão. A distribuição das

Tabela 1 - Resultado do branco das membranas utilizadas no processo de filtragem.

	Tratamento	Nd (pg)	Sm (pg)
Acetato e Celulose	Nenhum	5402	
	Ataque ácido (HNO_3 10%)	24	4
		35,04	74,23
Teflon	Nenhum	720	218

Estação	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$)	$\epsilon_{Nd(0)}$	T_{DM} (Ma)
Santa Branca	6,733	42,348	0,0961	0,511708 $\pm$ 21	-18,14	1718
Parateí	9,846	60,350	0,0986	0,511628 $\pm$ 18	-19,71	1862
Buquirinha	10,365	64,697	0,0968	0,511661 $\pm$ 23	-19,07	1790
Divisa	6,740	46,420	0,0878	0,511591 $\pm$ 20	-20,43	1745
Una	6,998	39,234	0,1078	0,511669 $\pm$ 25	-18,90	1964
Pindamonhangaba	7,162	41,592	0,1041	0,511684 $\pm$ 15	-18,61	1876
Guaratingueta	5,282	30,789	0,1037	0,511514 $\pm$ 20	-21,93	2106
Matos	7,969	45,565	0,1057	0,511774 $\pm$ 12	-16,86	1778
Piquete	10,140	56,010	0,1094	0,511577 $\pm$ 47	-20,70	2131
Queluz	8,775	48,962	0,1083	0,511663 $\pm$ 15	-19,01	1982

0,002% e o erro analítico $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ / 0,1, baseados em repetidas análises do padrão de rocha internacional BCR-1 e BHVO-1.

RESULTADOS As características isotópicas Sm-Nd dos pontos amostrados ao longo do RPS e das sub-bacias são apresentadas na tabela 2. A figura 5 descreve a distribuição geográfica das idades modelo T_{DM} dos pontos amostrados.

Os sedimentos em suspensão provenientes das sub-bacias e dos trechos do RPS apresentam uma pequena variação das características Sm-Nd (Tabela 2). Os valores de $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ foram todos muito negativos, entre -16,86 e -21,93, e os T_{DM} oscilaram entre 1,72

e 2,13 Ga.

O trecho do RPS a montante da estação de Santa Branca, apesar de ser a maior área analisada (37% da área total), pouco contribui para a descarga dos sedimentos em suspensão do rio Paraíba do Sul, pois os reservatórios de Paraibuna e Santa Branca retêm grande parte do sedimento drenado (Da Hora 1998, Roig 2005). O principal objetivo da amostragem deste ponto foi servir de referência para as variações observadas ao longo do RPS, permitindo estimar a contribuição das demais sub-bacias na análise da mistura e no cálculo do balanço de massa que atinge o reservatório do Funil.

As concentrações de Sm e Nd variaram entre 5,28 e 10,36 e entre 30,79 e 64,69 respectivamente. Os maiores valores de Nd estão relacionados às sub-bacias dos rios Paratei e Buquira, e os menores aos rios Guaratinguetá e Una. A razão da concentração Sm/Nd dos sedimentos mostrou-se constante com média de 5,96. A mesma uniformidade acontece com os valores de $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ e de T_{DM} (Fig. 6).

Com relação à idade modelo as sub-bacias de Divisa e Matos apresentaram os menores valores de T_{DM} entre 1,75 e 1,78 Ga, respectivamente, enquanto que as sub-bacias dos rios Piquete (2,13 Ga) e Guaratinguetá (2,11 Ga) têm os maiores valores de T_{DM} . As oscilações das idades modelo (T_{DM}) dos sedimentos refletem a variação do tipo de rocha fonte e da percentagem de ocorrências em área de cada unidade nas sub-bacias. Os maiores valores de T_{DM} das sub-bacias dos rios Piquete e Guaratinguetá refletem a presença de rochas com valores de T_{DM} mais elevados como o embasamento (8 e 21% da área das sub-bacias respectivamente) e os metassedimentos do Grupo Andreilândia (67% e 7% respectivamente). A figura 7 apresenta a distribuição espacial das unidades geológicas e os seus respectivos valores de T_{DM} para a sub-bacia dos rios Piquete e Matos.

DISCUSSÃO As idades modelo (T_{DM}) do Nd indicam que as rochas fonte dos sedimentos apresentam tempo de residência crustal entre, pelo menos, 1,73 e 2,13 Ga. A análise dos resultados evidencia o aumento gradativo ao longo do RPS das idades modelo (T_{DM}) de 1,72 (Santa Branca) para 1,98 (Queluz), figura 5. Este fato sugere que as sub-bacias que drenam as unidades geológicas com tempo de residência crustal maior tem uma forte influência na carga de sedimentos em suspensão que aporta o reservatório do Funil. Essas sub-bacias situam-se na margem esquerda do RPS, sendo representadas pelas águas provenientes dos rios Guaratinguetá e Piquete (fig. 5).

A mudança do comportamento isotópico do RPS e a contribuição dos seus afluentes também pode ser evidenciada comparando-se os valores de T_{DM} versus os valores de $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ (Fig. 8). Observa-se um alinhamento das amostras coletadas ao longo do RPS com um incremento dos valores de T_{DM} e uma diminuição dos valores de $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$. No trecho do RPS entre Santa Branca e Pindamonhangaba, as sub-bacias Paratei, Buquira e Una influenciam a descarga sólida do RPS com uma maior contribuição do rio Una (fig. 8). Para a estação de Queluz observa-se uma forte influência das sub-bacias da margem esquerda do RPS (Guaratinguetá e Piquete) com relação as sub-bacias da margem direita (Matos e Bocaina, Fig. 8). Este contexto demonstra a existência de uma homogeneização dos sedimentos em suspensão em termos da geoquímica isotópica Sm-Nd. A entrada de sedimentos com valores mais elevados de T_{DM} é incorporada à massa do material transportado gerando uma nova mistura, onde a assinatura isotópica reflete esta nova condição.

Figura 6 – Gráficos mostrando as variações da concentração de Nd, dos valores de $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ e de T_{DM} dos sedimentos para os pontos amostrados. * razão (Sm/Nd) multiplicado por 100.

Para melhor entender a contribuição de cada unidade geológica para os sedimentos em suspensão das sub-bacias e sua representatividade na descarga final no reservatório do funil, propõe-se uma comparação entre os dados dos sedimentos em suspensão e a média ponderada das possíveis fontes por sub-bacia.

Proveniência dos sedimentos em suspensão Tomando-se como

base as características geoquímicas do Sm e do Nd descritas anteriormente e considerando-se que os agentes antropogênicos não interferem de modo expressivo na composição isotópica Sm-Nd, e que não há entrada de material externo com cargas significativas de Sm-Nd transportado pelo ar ou por outro agente, pode-se propor que os isótopos de Sm-Nd encontrados nos sedimentos são provenientes na sua totalidade das rochas que

Figura 7 – Mapas geológicos mostrando a distribuição das unidades geológicas nas sub-bacias do rio Piquete (a) e Matos (b) além das amostras de rocha (?) e de sedimento em suspensão (9)

Figura 8 - T_{DM} versus $\epsilon_{Nd(0)}$ das amostras dos sedimentos em suspensão do rio Paraíba do Sul e das sub-bacias analisadas. Observa-se um alinhamento das amostras do rio Paraíba do Sul.

ocorrem na bacia. Se a bacia estiver em equilíbrio (*steady state*) pode-se considerar um balanço de massa entre a média ponderada das rochas inicialmente inalterada na bacia e o produto resultante do processo de intemperismo e erosão representado pela descarga sólida (Trimble 1977 e Stallard 1995). A correlação entre estes dois componentes é dado pela equação (1).

$$R_{sed-rocha} = \frac{[C_x]_{sed}}{[C_x]_{rochas}} \quad (1)$$

onde $R_{sed-rocha}$ é a razão entre a carga de sedimentos e a média ponderada das rochas na bacia para o elemento x ; $[C_x]_{rochas}$ é a média ponderada da concentração do elemento X das rochas fontes e $[C_x]_{sed}$ a concentração do elemento X na descarga sólida total transportada pelo rio.

Como as características dos sedimentos mudam de uma sub-bacia para outra torna-se necessário calcular para cada sub-bacia a composição da fonte "local" em função da proporção da ocorrência de cada rocha (Louvat e Allegre 1997). A partir desta estimativa pode-se estabelecer uma equação na qual considera-se a composição da rocha local para o Nd como a mistura da média da concentração de cada rocha que constitui para a bacia (Andersen & Laajoki 2003). Este mesmo raciocínio pode ser utilizado para a idade modelo ou para o $\epsilon_{Nd(0)}$. Este conceito pode ser expresso pelas seguintes equações:

$$C_{susp}^{Nd} = \sum_{i=1}^n X_i C_i^{Nd} \quad (2)$$

$$T_{DM\ susp}^{Nd} = \sum_{i=1}^n X_i T_{DM\ i}^{Nd} \quad (3)$$

$$\epsilon_{susp}^{Nd} = \frac{1}{C_{susp}^{Nd}} \sum_{i=1}^n X_i C_i^{Nd} \epsilon_i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1 \quad (5)$$

onde C_{susp}^{Nd} é a concentração do elemento no sedimento e C_i^{Nd} a concentração dos respectivos membros finais; ϵ_{Nd} e ϵ_i^{Nd} são os valores de ϵ_{Nd} dos componentes; $T_{DM\ susp}^{Nd}$ e $T_{DM\ i}^{Nd}$ são as idades modelo dos sedimentos em suspensão e das rochas que constituem os membros finais respectivamente; e X_i a contribuição relativa em fração de peso de cada componente.

Por tratar-se de análise de sedimentos em suspensão, o componente X_i , que normalmente é calculado em fração de peso de cada uma das fontes nos estudos de paleo-ambientes (Andersen & Laajoki 2003), é determinado em relação à porcentagem da área de contribuição de cada unidade geológica que ocorre na bacia (Louvat & Allegre 1997). As sub-bacia do RPS apresentam uma morfologia bastante compartimentada (figura 4), com regiões planas

e áreas de declividades acentuadas com razões área superficial/área plana de até 1,3, ou seja, a área superficial pode ser até 30% maior que a área plana. Por este motivo, propõe-se aqui que o valor de X_i seja calculado pela área da superfície de contribuição e não pela área plana como estabelecido nos trabalhos que utilizam este procedimento (Louvat & Allègre, 1997). O cálculo da área superficial e da razão área superficial/área plana para cada unidade geológica por sub-bacia foi determinado utilizando-se de Modelos digitais de Terreno (MDT) gerados a partir das cartas 1:50.000 do IBGE e de técnicas de geoprocessamento (Roig 2005).

Os membros finais utilizados neste estudo foram definidos a partir das unidades que ocorrem na área de drenagem a montante do ponto amostrado. A assinatura isotópica de cada membro final foi determinada segundo dois critérios: média das amostras para cada unidade existente a montante do ponto amostrado (fig. 7), ou, caso não haja informações na sub-bacia, a média de todas as amostras da unidade em questão existentes dentro da área de estudo (Fig. 3). De todas as unidades reconhecidas na bacia do RPS, somente os sedimentos das planícies de inundação não apresentam assinatura isotópica conhecida. Neste caso utilizou-se a mesma assinatura dos sedimentos da Bacia de Taubaté (1,9 Ga, Sant'Anna *et al.* 2003), que é equivalente à média ponderada de todas as unidades da bacia do RPS a montante do reservatório do Funil. De posse destes dados e das assinaturas isotópicas dos sedimentos em suspensão processou-se a equação (1) substituindo-se os valores de $[C_x]_{rochas}$ pelos seus correspondentes das equações (2) a (4), cujos resultados são apresentados na tabela 3 e na figura 10.

Os dados analisados (Tabela 3 e Fig. 10A) demonstram que as concentrações do Nd nos sedimentos em suspensão são em geral 20 a 50% menores do que a média ponderada das rochas por sub-bacia. Esta diluição da concentração pode ser explicada pela presença de matéria orgânica (MO) no material amostrado ou pelo aumento na proporção de minerais com baixa concentração de ETR. A distribuição mineralógica dos sedimentos em suspensão apresentada por Rego (2002) não demonstrou a existência de quantidades significativas de quartzo ou outro mineral inerte em relação ao transporte de ETR. Por outro lado, as águas da bacia do RPS apresentam uma elevada carga de MO (12 e 27%, DAEE 1981), o que pode explicar a alta diluição do Nd.

Os valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ dos sedimentos foram sistematicamente menores que a média ponderada das rochas (ca. 8%), com uma correlação de 0,73 (Tabela 3). A diferença entre os valores observados e calculados é em média de 1,08 (unidades de $\epsilon_{Nd(0)}$) e pode ser considerada dentro das incertezas do método. O $\epsilon_{Nd(0)}$

Tabela 3 - Tabela com os resultados da comparação entre as assinaturas isotópicas dos sedimentos em suspensão e da média ponderada das rochas.

Rio	Concentração				ϵ_{Nd}				T_{DM}			
	Rochas*	Sed.	Dif.	R**	Rochas*	Sed.	Dif.	R	Rochas*	Sed.	Dif.	R**
Santa Branca	72.4	42.3	30.1	0.58	-16.5	-18.1	1.6	1.10	1.7	1.72	0.0	1.01
Parateí	75.3	60.3	14.9	0.80	-17.3	-19.7	2.3	1.14	1.8	1.86	-0.01	1.0
Buquirinha	63.9	64.7	-0.7	1.01	-17.9	-19.1	1.1	1.06	1.7	1.79	-0.03	1.02
Divisa	73.1	46.4	26.8	0.63	-17.3	-20.4	3.1	1.18	1.8	1.75	0.14	0.93
Una	74.7	39.2	35.5	0.53	-17.1	-18.9	1.7	1.10	1.8	1.96	-0.16	1.09
Pindamonhagaba	68.4	41.6	26.8	0.61	-17.8	-18.6	0.7	1.04	1.8	1.88	-0.02	1.01
Matos	74.8	45.6	29.3	0.61	-17.1	-16.8	-0.2	0.99	1.7	1.78	0.00	1.00
Guaratinguetá	68.6	30.8	38.2	0.45	-20.0	-21.9	1.9	1.10	2.0	2.11	-0.06	1.03
Piquete	47.6	56.0	-8.4	1.18	-20.5	-20.7	0.1	1.01	2.0	2.13	-0.04	1.02
Queluz	68.2	48.9	19.3	0.72	-18.2	-19.0	0.8	1.05	1.8	1.98	-0.09	1.05

representa a razão isotópica de cada amostra analisada normalizadas pelo mesmo denominador comum, o CHUR (*Chondritic Uniform Reservoir*), o que permite e facilita a comparação entre diferentes amostras.

A comparação entre as idades modelos T_{DM} dos sedimentos e da média ponderada das rochas encontradas na bacia demonstram uma excelente correlação (0,86), com o $R_{sed-rocha}$ (eq. 1) médio de 1,02 (Tabela 3 e fig. 10C).

A análise das figuras 10B e 10C ratificam a homogeneidade dos sedimentos em suspensão ao longo do RPS. Todavia, embora sutil, percebe-se uma modificação deste patamar com relação às bacias de Guaratinguetá e Piquete, que tem uma predominância do

aporte de material com T_{DM} maior. Mesmo considerando que a vazão líquida destes rios (2 a 10 m³/s) seja bem menores que a do RPS (79 a 145 m³/s), a carga de sedimentos foi suficiente para provocar uma mudança na composição isotópica dos sedimentos do RPS, elevando o valor de T_{DM} e diminuindo o $\epsilon_{Nd(0)}$ na estação de Queluz. Este fato coaduna com os dados hidrossedimentométricos que apontam a região entre Guaratinguetá e Queluz como as regiões de maior produção de sedimentos (Roig 2005).

CONCLUSÃO As assinaturas isotópicas Sm-Nd dos sedimentos analisados mostraram-se bastante homogêneas com idade modelo T_{DM} indicativas de fontes Paleoproterozóicas com média de 1,9 Ga $\pm 0,15$ e valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ em torno de -19,3.

Apesar desta clara homogeneização das assinaturas isotópicas, a escala de trabalho utilizada para a amostragem foi capaz de identificar as pequenas variações das características isotópicas das sub-bacias e a sua influência na composição dos sedimentos em suspensão do RPS. Estas variações acompanham as mudanças nas características isotópicas das rochas contidas nas sub-bacias e a sua importância relativa para o RPS.

Dos três parâmetros analisados (concentração, $\epsilon_{Nd(0)}$ e T_{DM}), a concentração dos elementos Nd e Sm tem uma baixa correlação (-0,35) com um $R_{sed-rocha}$ (eq. 1) médio de 0,71 e um índice de correlação de -0,45 (Tabela 3, fig. 10A). Deste modo, não é possível utilizar a concentração na determinação da contribuição de cada unidade geológica na carga de sedimentos em suspensão.

Por outro lado, os valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ e T_{DM} apresentaram boas correlações entre a descarga dos sedimentos em suspensão e a média ponderada das rochas existentes na área de drenagem, com valores de $R_{sed-rocha}$ (eq. 1) médios de 1,08 e 1,02 e desvio padrão de 0,06 e 0,04 respectivamente (Tabela 3, figs. 10A e 10B). As variações observadas são menores do que as incertezas no cálculo destes parâmetros para as rochas fontes.

Os resultados de balanço de massa obtidos para $\epsilon_{Nd(0)}$ e T_{DM} indicam que, pelo menos para os elementos Sm e Nd, existe um equilíbrio entre os processos intempéricos e de erosão/transporte para este segmento da bacia do rio Paraíba do Sul, demonstrando que estes processos estão em equilíbrio dinâmico e que o sistema pode ser considerado fechado para o período analisado.

A partir destes resultados foi possível determinar uma classificação gradual das sub-bacias estudadas quanto à influência destas na dinâmica do fluxo de sedimentos em suspensão da bacia do RPS. As sub-bacias dos rios Guaratinguetá e Piquete caracterizam-se como as que mais contribuem para o fluxo de sedimentos em suspensão que atinge o reservatório do Funil. As sub-bacias dos rios Parateí, Buquirinha, Uma e Bocaina contribuem de forma mediana ao fluxo de sedimentos em suspensão ao longo do RPS. Já as sub-bacias Santa Branca, Jaguarí, Divisa e Matos pouco influem na carga de sedimentos em suspensão drenada ao longo do RPS dentro da área estudada. Estes resultados estão em consonância com os cálculos executados por Roig (2005) utilizando-se da descarga sólidas em suspensão para a determinação da produção específica de sedimentos do RPS, onde o trecho entre as bacias de Guaratinguetá e Piquete apresenta os maiores valores, podendo ser de duas a dez vezes maior que a produção das outras sub-bacias analisadas.

No que tange aos procedimentos metodológicos, a utilização da área superficial extraída dos MDT para o cálculo do parâmetro X_i empregado nas equações (2) a (4) mostrou-se adequado com melhores resultados do que aqueles obtidos com o emprego da área plana. A capacidade de determinar a dimensão de cada unidade

Figura 9

Figura 9 - Diagramas mostrando a relação entre os sedimentos em suspensão e a média ponderada das rochas existente na bacia de drenagem. (a) concentração de Nd (ppm); (b) valores de $\epsilon_{Nd(0)}$; (c) idade modelo - T_{DM} .

e das suas assinaturas isotópicas torna o emprego desta sistemática mais simples e objetiva nos estudos de sedimentos recentes do que nos clássicos estudos de proveniência de metassedimentos.

Embora os resultados apresentados tenham sido promissores, algumas questões permanecem abertas e necessitam de aprimoramentos. Entre as várias questões destacam-se: Qual o significado da menor correlação ($R_{\text{sed-rocha}}$) do $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ em comparação com a idade modelo T_{DM}^2 ? Por que os $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ dos sedimentos foram sistematicamente menores do que a média ponderada das rochas fontes? O estado de equilíbrio entre os processos intempéricos a de remoção de sedimentos observado na estação seca também ocorre no período das chuvas?

Visando responder a estas e outras perguntas, foi realizada uma terceira campanha de campo em fevereiro de 2003 com a coleta de 27 pontos. As amostras foram processadas e os resultados estão sendo analisados.

Agradecimentos A Uerj/CAPES através do programa PICDT, pela bolsa de doutorado do 1º autor. A Superintendência de estudos e Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Energia Elétrica (SIH/ANEEL) pelo financiamento do projeto. A equipe de Hidrosedimentometria de Furnas pela ajuda dos trabalhos de campo, em especial do Sr Soares. Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito

Referências

- Allègre, C.J., Dupré B., Gaillardet J., Négrel P. 1996. Sr-Nd-Pb isotopos systematics in Amazon and Congo rivers systems, Constrains about erosion processes. *Chemical Geology*, **131**:93-112.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural provinces: na introduction. *Earth Sci. Review*, **17**:1-29.
- Andersen Y & Laajoki K. 2003. Provenance characteristics of Mesoproterozoic metasedimentary rocks from Telemark, South Norway: a Nd-isotope mass-balance model. *Prec. Res.*, **126**:95-122.
- ANEEL. 2005. BIG – Banco de Informações de Geração. www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp (março de 2005).
- Basu A. R., Sharma M., DeCelles P.G. 1990. Nd, Sr-isotopic provenance and trace element geochemistry of Amazonian foreland basin fluvial sands, Bolivia and Peru: implications for ensialic Andean orogeny. *Earth Planet. Sci. Letters*, **100**:1-17.
- Bayon G., German C.R., Boella R.M., Milton J.A., Taylor, R.N., Nesbitt, R.W. 2002. An improved method for extrating marine sediments fractions and its application to Sr and nd isotopic analysis. *Chemical Geology*, **187**:179-199.
- Bengtsson H. & Stevens R. L. 1998. Source and grain-size influences upon the clay mineral distribution in the Skagerrak and norther Kattegat. *Clay Minerals*, **33**:3-13.
- Braga F. I. 2002. *Estruturação tectônica e metamorfismo da região de Cristina/Itajubé-MG*. Tese de Doutorado, IG -UNESP. 197p.
- Carvalho N. O., Filizola Jr, N. P., Santos P. M. C., Lima J. E. F. W. (Eds.) 2000. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. ANEEL/ SIH. Brasília. 132pp.
- Clift P., Lee J., Clark M.K., Blusztajn J. 2002. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening, a record from the South China Sea. *Marine Geology*, **184**:207-226
- DAEE (Ed.) 1981. *Estudos Morfológicos do rio Paraíba do Sul*. Relatório 3. CTH-DAEE. São Paulo. 345p.
- DaHora M.A.G. 1998. Diagnóstico preliminar das condições hidrossedimentológicas do rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes. In: ABRH, Encontro de engenharia de sedimentos, III, *Anais*, 49-55
- Dickin A. P. (ed.) 1995. *Radiogenic isotope geology*. Cambridge University Press, London, 452p.
- Fetter A.H., Hackspacher P.C., Dantas L., Saad A.R.L., Bistrich, C.A., Ávila C.A. 2003. Nd Provenience of local cenozoic sedimentary deposits in continental soouthastern Brazil: Evidence for limited mixing of sediment sources during erosion, transport and deposition. In: South American Symposium of Isotope Geology, IV. *Shrot papers-Cdrom*, p.57-59.
- Frost C.D., O'Nions R.K., Goldstein S.L. 1986. Massa Balance for Nd in the Mediterranean sea. *Chemical Geology*, **55**:45-50.
- Gaillardet, J., Dupré B., Allègre C.J. 1995. A global geochemical mass budget applied to the Congo Basin rivers: Erosion rates and continental crust composition. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **59**:3469-3485.
- Gaillardet, J., Dupré B., Allègre C.J., Négrel P. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chem. Geol.*, **142**:141-173
- Gioia S.M.C.L. & Pimentel, M.M. 2000. The sm-nd isotopic method in the geocronology laboratory of University of Brasília. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **72**:219-245.
- Goldstein S.L., O'Nions R.K., Hamilton P.J. 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth Planet. Sci. Letters*, **87**:249-265.
- Heilbron M., Tupinambá M., Almeida J.C.H., Valeriano C.M., Valladares C.S., Duarte, B.P. 1998. New constraints on the tectonic organization and structural styles related to the Brasiliano collage of the central segment of the Ribeira belt, SE Brazil, In: *International Conference on PreCambrian and Craton Tectonics/International Conference on Basement Tectonics*, 14, Extended Abstracts, 15-17.
- Juliani C., Hackspacher P.C., Dantas E.L., Fetter A.H. 2000. The Mesoproterozoic Volcano-Sedimentary Serra do Itaberaba group of the Central Ribeira belt, São Paulo State, Brazil: Implications for the age of the overlying São Roque group. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:82-86.
- Louvat P., Allègre C.J. 1997. Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **61**:3645-3669,
- Martin C.E. & McCulloch, M.T. 1999. Nd-Sr isotopic and trace element geochemistry of river sediments and soils in a fertilized catchment, New South Wales, Australia. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **63**:287-305.
- Mearns E.W. 1992. Samarium-neodymium isotopic constraints on the provenance of Brent Group. In: A.C. Morton, R.S. Haszeldine, M.R. Giles, S. Brown (eds.) *Geology of the Brent Group*. Geological Society Special Publication, **61**:213-255.
- Morais S.M., Dehler N.M., Sachs L.L.B., Rodrigues, J.B. 1999. *Programa Levantamento Geológico Básico do Brasil. Folha SF.23-Y-B Guaratinguetá, Escala 1:250.000*. Ministério de Minas e Energia – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais.
- Négrel P., Allègre C.J., Dupré B., Lewin E. 1993 Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: The Congo Basin case. *Earth Planet. Sci. Letters*, **120**:59-76

- Nelson B.K. & DePaolo D.J. 1988. Application of Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematic to studies of provenance and basin analysis. *J. Sed. Petrol.*, **58**:348-357.
- O'Nions R.K., Hamilton P.J., Hooker P.J. 1983. A Nd isotope investigation of sediments related to crustal development in the British Isles. *Earth Planet. Sci. Letters*, **63**:229-240.
- Parra M., Faugères J.C., Grousset F., Pujol C. 1997. Sr-Nd isotopes as tracers of fine-grained detrital sediments: the South-Barbados accretionary prism during the last 150kyr. *Marine Geol.*, **136**:225-243.
- Pereira R.M. 2001. *Caracterização geocronológica, geoquímica, geofísica e metalogenética de alguns plutonitos graníticos da região do médio rio Paraíba do Sul, e Alto Rio Grande, segmento central da Faixa Ribeira*. Tese de Doutorado. IG/UFRJ, 235p.
- Ragatky C.D. 1998. *Contribuição à geoquímica e geocronologia do domínio São Roque e da Nappe Socorro-Guaxupé na região de Igaratá e Piracaia –SP*. Tese de Doutorado. IG/USP, 130p.
- Rego A.P.M. 2002. *Caracterização e proveniência dos sedimentos em suspensão da porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul*. Dissertação de Mestrado, IG/UnB, 103p.
- Riccominni C. 1989. O rift continental do sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, IG/USP, 256p.
- Roig H.L. 2005. *Modelagem e Integração de Dados Aplicados à Análise dos Processos Erosivos e de Sedimentação. O Caso da Bacia do Rio Paraíba do Sul, SP*. Tese de Doutorado. IG/UnB, 221 p.
- Roig H.L., Dantas E., Meneses P.R. 2003. Nd isotopes from suspended load sediments and weathering process in the rio Paraíba do Sul river System. In: South American Symposium of Isotope Geology, IV, *Shrot papers, CDrom*.
- Roig H. L., Dantas E., Meneses P.R. 2004. Nd isotopes from the Ribeira belt in the Rio Paraíba do Sul region, SE Brazil: significance for its Neoproterozoic evolution. the 750-550 Ma Brasiliano Event of South America. Neiberg R, Trown R., Hackspacher P. *Journal of the Virtual Explorer. Eletronic Edition, Vol. 17 paper 5*
- Roy S., Gaillardet J., Allègre C.J. 1999. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **63**:1277-1292.
- Sant'Anna L.G., Riccomini C., Dantas E., Fetter A., Roig H.L. 2003. Geology, mineralogy and provenance of detrital clay minerals of the Continental Rift of Southeastern Brazil. In: South American Symposium of Isotope Geology, IV, *Shrot papers, CD-Rom*
- Sato K. 1998. *Evolução crustal da plataforma sul americana, com base na geoquímica isotópica Sm-Nd*. Tese de Doutorado IG/USP, 297p.
- Stallard R.F. 1995. Relating chemical and physical erosion. In: A. F. White A.F. & Brantley. S.L. (eds.) *Chemical weathering rates of silicate minerals. Rev. Mineralogy* **31**:543-564.
- Tricca A., Stille P., Steinmann M., Kiefel B., Samuel, J., Eikenberg, J. 1999. Rare earth elements and Sr and Nd isotopic compositions of dissolved and suspended loads from small river systems in the Vosges mountains France, the river Rhine and groundwater. *Chem. Geol.*, **160**:139-158.
- Trimble W.S. 1977. The fallacy of the stream equilibrium in contemporary denudation studies. *Amer. J. Sci.* **277**:876-887.
- Trouw R.A., Heilbron M., Ribeiro A., Paciullo F.V.P., Valeriano C., Almeida J.H., Tupinambá M., Andreis R. 2000. The Central Segment of the Ribeira belt. In: U.G. Cordani. E.J. Minali, A. Thomais Filho, D.A. Campos (eds.). *Tectonic Evolution of Sout Americam*. SBG-31 International Geolical Congress, Rio de Janeiro. 297-310.
- Trouw R.A., Ribeiro A., Paciullo F.V.P. 2003. GEOLOGIA DA FOLHA POUSO ALTO. In: Pedrosa Soares, C.A. Noci, A., Trouw R.A., Heilbron, M. (eds.). *Projeto sul de Minas .Belo Horizonte, UFMG, CD-ROM*, 405-427.
- Stallard. R.F. & Edmond J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon: The influence of geology and wethering enviroment on the dissolved load. *J. Geophys. Res.* **88**:9671-9688.
- Weldeab S., Emeis K. C., Hemleben C., Siebel W. 2002. Provenance of lithogenic surface sediments and pathways of riverine suspended matter in the eastern Mediterranean Sea: evidence from 143Nd/144Nd and 87Sr/86Sr isotope ratios. *Chem. Geol.*, **186**:139-149.
- WMO. 1994. *Guide to hydrological practices*. Genebra WMO Pub. 168 (5ª ed.) 735pp.

Manuscrito A-1513

Recebido em 13 de julho de 2004

Revisão dos autores em 18 de agosto de 2005

Revisão aceita em 28 de agosto de 2005