Distribuição de metais pesados e isótopos de Pb em sedimentos do rio Amapari, setor de Pedra Branca do Amapari – Porto Grande, Amapá, Brasil

Distribution of heavy metals and Pb isotopes in overbank sediments from the Amapari river, Pedra Branca do Amapari – Porto Grande, Amapá, Brazil

Danúbia Tavares da Silva[1], Jean Michel Lafon[1], José Augusto Martins Corrêa[1]

[1]Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta dados mineralógicos e geoquímicos de metais pesados e de isótopos de Pb em sedimentos recentes, provenientes do rio Amapari e alguns de seus tributários, na região da Serra do Navio, parte central do estado do Amapá. Os sedimentos têm composição mineralógica formada essencialmente por quartzo, caulinita, muscovita e gibbsita, e apresentam grande heterogeneidade geoquímica e isotópica de Pb. Os resultados geoquímicos mostraram que os sedimentos têm altos teores de metais pesados e sofreram os mesmos processos de enriquecimento para todos os metais investigados. Os metais estão principalmente associados a minerais de Fe, e os argilominerais tiveram um papel secundário na concentração desses metais. A variação significativa na composição isotópica do Pb permitiu construir uma isócrona no diagrama $^{207}Pb/^{204}Pb$ *vs*. $^{206}Pb/^{204}Pb$, com idade de 2169 ± 140 Ma, indicando que os sedimentos são provenientes essencialmente das unidades paleoproterozoicas (rochas supracrustais e granitoides associados), sem contribuição significativa das unidades do embasamento arqueano. Não foi evidenciada correlação entre a localização dos pontos em relação às áreas com atividades de mineração e aos teores dos metais.

Palavras-chave: Rio Amapari. Sedimentos recentes. Metais pesados. Isótopos de Pb. Amapá.

Abstract: This work presents mineralogical, geochemical and Pb isotope compositions of heavy metals from overbank sediments of the Amapari river and its tributaries, in the region of Serra do Navio, central Amapá. The sediments are mainly composed of quartz, kaolinite, gibbsite and muscovite, displaying a large geochemical and Pb isotopic heterogeneity. The geochemical results indicate high contents of heavy metals and that the sediments underwent the same processes of enrichment for all investigated metals. The metals are mainly associated to Fe-minerals, while clay minerals are not relevant for the concentration of those metals. The variation of Pb isotopic compositions permitted to define an isochron in the $^{207}Pb/^{204}Pb$ vs. $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram with an age of 2169 ± 140 Ma, indicating that the sediments came essentially from the surrounding Paleoproterozoic units (supracrustal rocks and associated granitoids), without any significant contribution from the units of the Archean basement. Metal contents and sample locations do not show any relationships with the major mining prospects in the area.

Keywords: Amapari river. Recent sediments. Heavy metals. Pb isotopes. Amapá.

SILVA, D. T., J. M. LAFON & J. A. M. CORRÊA, 2013. Distribuição de metais pesados e isótopos de Pb em sedimentos do rio Amapari, setor de Pedra Branca do Amapari – Porto Grande, Amapá, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 8(2): 177-203.
Autor para correspondência: Jean Michel Lafon. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Av. Augusto Correa, 1 – Terra Firme. Belém, PA, Brasil. CEP 66075-110 (lafonjm@ufpa.br).
Recebido em 31/03/2013
Aprovado em 18/07/2013
Responsabilidade editorial: Hilton Tulio Costi

INTRODUÇÃO

O contexto geológico do estado do Amapá aponta para um elevado potencial mineral, haja vista a ocorrência de extensas sequências tipo *Greenstones Belts*, às quais estão geralmente associados depósitos minerais de ouro, ferro e manganês de relevante valor econômico. A principal atividade econômica do Amapá continua sendo controlada pelo setor mineral, principalmente pela produção de ouro e ferro da Serra do Navio, região central do estado. Esta região é atravessada pelo rio Amapari, importante afluente do rio Araguari, cuja bacia hidrográfica é a mais importante e extensa do Amapá. Considerando a ampla ocorrência de minerais metalíferos e as atividades de mineração nessa região, o objetivo principal deste trabalho consiste em investigar e quantificar a distribuição de metais pesados (Pb, Cu, Zn, Ni, Mn e Cr) e avaliar o comportamento dos isótopos de Pb em sedimentos recentes do rio Amapari e seus tributários, para tentar evidenciar as fontes naturais e as possíveis contribuições da mineração.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região central do estado do Amapá, ao longo do rio Amapari, um dos principais afluentes da margem direita do rio Araguari, que constitui um dos sistemas de drenagem mais expressivos da costa amapaense. Com cerca de 305 km de extensão, o rio Amapari tem sua nascente na serra de Tumucumaque, localizada no Planalto das Guianas, na fronteira do Brasil com o Suriname e a Guiana Francesa. O rio Amapari e seus tributários ocupam a porção sul da bacia hidrográfica do rio Araguari, no contexto geomorfológico dos Planaltos Residuais do Amapá, que é caracterizado por maciços residuais que formam um conjunto topograficamente elevado (Rabelo *et al*., 2008). O setor estudado encontra-se, mais especificamente na parte final do rio Amapari, no trecho Pedra Branca do Amapari – Porto Grande, perto de sua confluência com o rio Araguari. Nesse trecho, o rio Amapari é encaixado entre as serras do Navio e de Cupixi, e a maioria dos rios dessas serras deságua nele, inclusive aqueles próximos das áreas de mineração.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A região central do estado do Amapá está contida na Província Maroni-Itacaiunas, que ocupa toda a porção oriental do Escudo das Guianas, desde a Venezuela até o noroeste do estado do Pará, no Brasil. Essa província constitui um extenso domínio continental, cuja evolução principal está relacionada ao ciclo orogenético Transamazônico, com unidades geológicas de idade paleoproterozoica, predominantemente entre 2,25 e 1,95 Ga (Tassinari *et al*., 2000; Delor *et al*., 2003).

Nesse contexto geológico (Figura 1), o estado do Amapá pode ser dividido em um domínio norte, onde predominam granitoides e ortognaisses paleoproterozoicos, e um domínio centro-sul, onde predominam unidades arqueanas retrabalhadas durante o ciclo Transamazônico (Montalvão & Tassinari, 1984; Sato & Tassinari, 1997; Avelar *et al*., 2003; Rosa-Costa *et al*., 2006).

O domínio centro-sul foi caracterizado como um bloco continental arqueano, denominado Bloco Amapá, formado por rochas metamórficas e plutônicas do embasamento arqueano e granitoides, além de sequências tipo *Greenstone Belt* paleoproterozoicas (Ricci *et al*., 2001; Rosa-Costa *et al*., 2003, 2006; McReath & Faraco, 2006). O Bloco Amapá se estende até o noroeste do estado do Pará, sendo limitado a sul por um arco magmático riaciano, denominado domínio Carecuru (Rosa-Costa *et al*., 2006). O limite norte é marcado por faixas metavulcanossedimentares do Grupo Vila Nova e granitoides associados. Esse limite foi inferido a norte da Serra do Navio, porém ainda não está perfeitamente identificado (Rosa-Costa *et al*., 2008). A continuação a oeste desse limite também ainda não foi bem determinada, devido à dificuldade de acesso à área (Rosa-Costa *et al*., 2006). A área de estudo localiza-se, portanto, próximo à borda norte do Bloco Amapá e

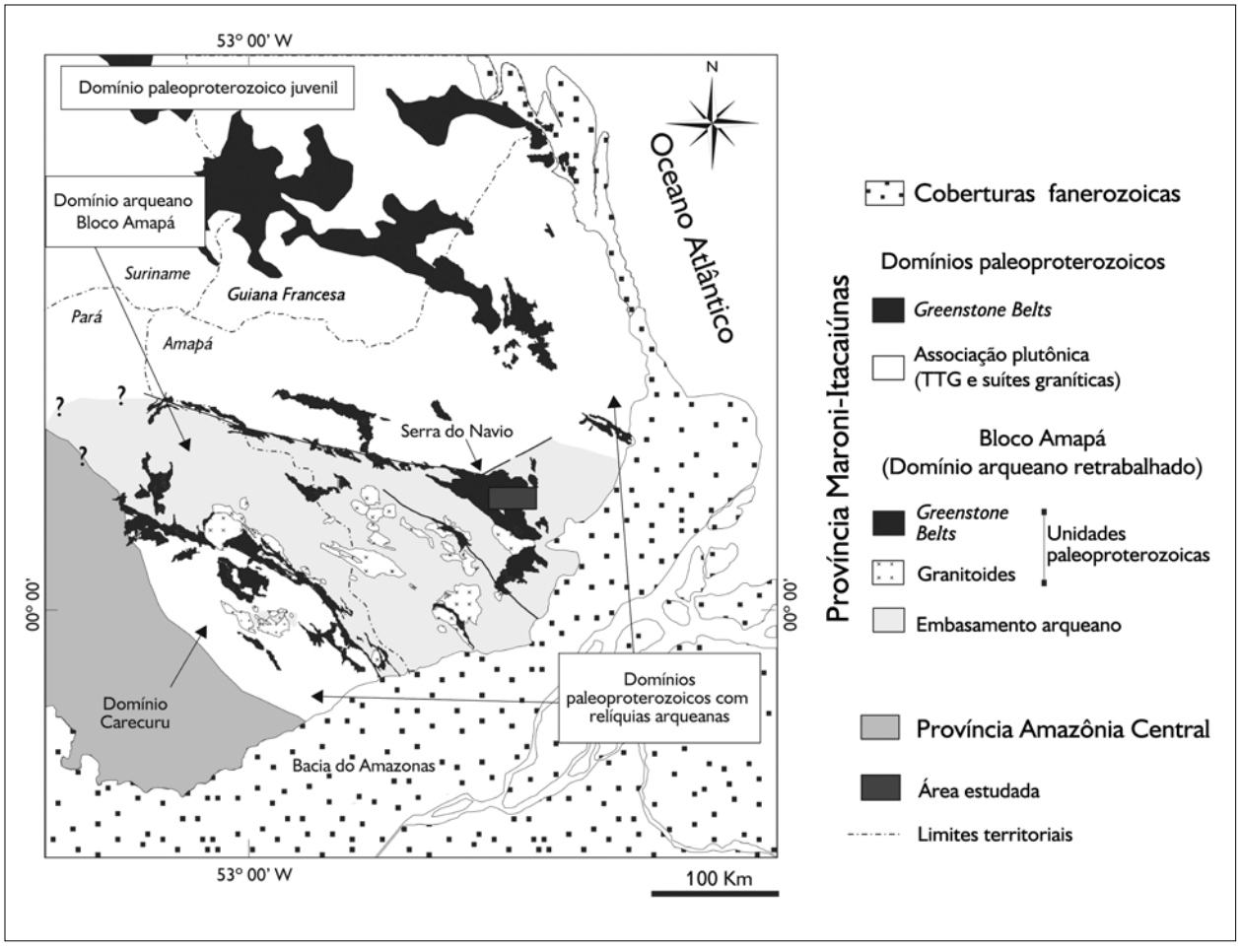

Figura 1. Quadro geotectônico da porção sudeste do Escudo das Guianas, mostrando os domínios paleoproterozoicos e arqueanos (Rosa-Costa et al., 2006).

as características principais das unidades geológicas são descritas a seguir (Figura 2).

Embasamento arqueano

O embasamento é constituído por um conjunto de rochas granito-gnáissicas de idade arqueana. Os gnaisses são predominantemente tonalíticos e granodioríticos, exibindo um grau de migmatização fraco a moderado. Frequentemente apresentam intercalações de corpos anfibolíticos, dispostos concordantemente ao bandamento gnáissico (Ricci *et al*., 2001; CPRM, 2004). Esses autores englobaram as rochas arqueanas da região nos complexos Tumucumaque e Guianense e em uma unidade de granitoides arqueanos. O primeiro registro de idade arqueana foi identificado em tonalitos e gnaisses do setor de Cupixi (idade isocrônica Rb-Sr: 2994 ± 20 Ma; Montalvão & Tassinari, 1984). Uma idade Pb-Pb em zircão de 2849 ± 6 Ma foi determinada para a cristalização do protólito ígneo de um gnaisse tonalítico do mesmo setor (Avelar *et al*., 2003). Gnaisses e granitoides desse embasamento forneceram idades modelo Nd T_{DM} entre 3,36 e 2,94 Ga, indicando que a crosta continental deriva de fontes paleo a mesoarqueanas (Sato & Tassinari, 1997; Avelar, 2002; Avelar *et al*., 2003).

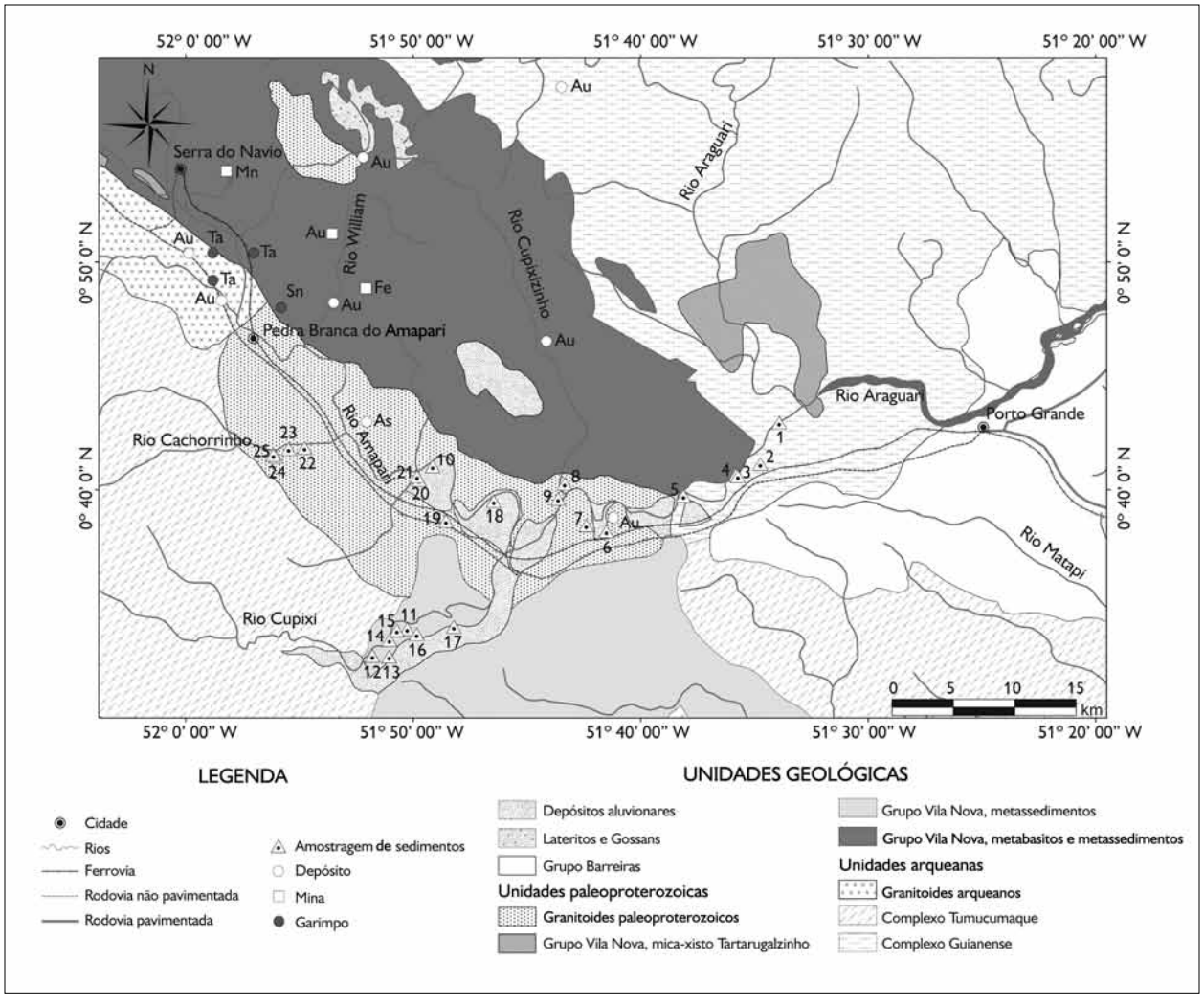

Figura 2. Mapa geológico simplificado com as principais unidades geológicas da região da Serra do Navio, região central do Amapá (Faraco *et al*., 2004).

Unidades Paleoproterozoicas

Rochas supracrustais (Grupo Vila Nova)

O Grupo Vila Nova ocorre na forma de faixas alongadas com orientação aproximadamente NW-SE, discordantemente assentadas sobre o embasamento arqueano. Trata-se de uma sequência metavulcanossedimentar paleoproterozoica, do tipo *Greenstone Belt*, metamorfizada nas fácies xistos-verdes a anfibolito (Montalvão, 1985). Datações K-Ar em micas provenientes de xisto revelam idades de 1,82 Ga e 1,76 Ga, e idades de 2,09 Ga em anfibólios de anfibolitos (Montalvão & Tassinari, 1984). Uma idade Sm-Nd de 2267 ± 66 Ma em rochas anfibolíticas e actinolita-xistos do *Greenstone Belt* Ipitinga, no limite sul do Bloco Amapá (McReath & Faraco, 2006), reforça a idade paleoproterozoica das sequências metavulcanossedimentares da região central do Amapá e permite correlacioná-las com os outros *Greenstone Belts* do sudeste do Escudo das Guianas (Gibbs & Olszewski, 1982; Gruau *et al*., 1985; Vanderhaege *et al*., 1998; Delor *et al*., 2003). Na área da Serra do Navio, a coluna

estratigráfica básica descrita por Scarpelli *et al*. (1963), Carvalho *et al*. (1995) e McReath & Faraco (2006) é apresentada a seguir.

Anfibolitos

Os anfibolitos constituem a base da sequência supracrustal, com espessura estimada entre 1 e 2 km, e estendem-se em largas faixas de direção NW-SE. São rochas de cor esverdeada, foliadas, com granulação fina a média, formadas por hornblenda, plagioclásio e epidoto, contendo quase sempre magnetita como acessório. Ocorrem na porção norte da área estudada em contato com granitoides, pegmatitos, rochas carbonatadas e formações ferríferas bandadas de fácies silicatada. É comum apresentarem bandas de espessuras milimétricas compostas por diopsídio, biotita e muito raramente grunerita (NATRONTEC, 2007). Estudos geoquímicos sugerem que os anfibolitos da Serra do Navio derivam essencialmente de andesito-basaltos de tipo MORB transicionais (T-MORB), formados em contexto extensional (Tavares, 2009). Valores positivos de ε_{Nd}, entre +0,91 e +3,55, atestam uma derivação mantélica, porém com leve contribuição crustal continental (Tavares, 2009).

Rochas metassedimentares

A sequência metassedimentar, com espessura total em torno de 700-800 m, varia de local para local, sugerindo mudanças nas condições paleoambientais de deposição. É constituída essencialmente por xistos aluminosos, lentes de mármore com rodocrosita e quartzitos. Os metassedimentos ricos em manganês e/ou ferro ocorrem próximos à base da sequência. Os xistos, mármores e quartzitos são, respectivamente, produtos do metamorfismo de argilitos, calcários e cherts, depositados em um ambiente marinho com boa circulação das águas. Rochas cálcio-silicatadas e para-anfibolitos são amplamente distribuídos. Quartzo-biotita-granada-xistos, xistos grafitosos e carbonatos manganesíferos sobrepõem-se estratigraficamente a essas rochas.

Na região da Serra do Navio, o pacote de xistos apresenta fácies quartzosa, biotítica e grafitosa, com mineralogia básica constituída por quartzo, biotita, muscovita, grafita, andaluzita, sillimanita e, como acessórios, turmalina, plagioclásio e pirita. Lentes de mármore e rochas cálcio-silicatadas, com espessuras centimétricas a métricas, ocorrem na fácies quartzosa e são constituídas essencialmente de calcita, diopsídio e, acessoriamente, granada, tremolita e pirrotita. Lentes de mármore manganesífero (19% < Mn < 36%) ocorrem na fácies grafitosa, com predominância de rodocrosita e tefroita, tendo como acessórios espessartita, rodonita e biotita. A oxidação do protominério de manganês gera principalmente criptomelana e, em quantidade menor, pirolusita e psilomelana. Formações ferríferas bandadas ocorrem em faixas de até algumas dezenas de metros de espessura, orientadas segundo N-S ou NW-SE. Cummingtonita-hornblenda-xistos, para-anfibolitos, quartzo-xistos e micaxistos são também encontrados. Depósitos auríferos de origem hidrotermal estão hospedados principalmente nos xistos e, secundariamente, nas formações ferríferas. A mineralização depositou ouro livre e sulfetos auríferos ao longo de falhas (Melo *et al*., 2003; NATRONTEC, 2007).

Granitoides paleoproterozoicos

Várias intrusões de granitoides paleoproterozoicos estão associadas às sequências metavulcanosssedimentares ou cortam o embasamento arqueano. São corpos de rochas de composição tonalítica, granodiorítica e monzogranítica. Pegmatitos também foram descritos na Serra do Navio.

Dois grupos de granitoides associados às sequências supracrustais na Serra do Navio foram distinguidos de acordo com suas características geoquímicas (Lafon *et al*., 2008; Tavares, 2009). Monzogranitos e granodioritos foliados exibem características de granitos subalcalinos, fracamente peraluminosos e similares aos granitos do tipo A, enquanto que granodioritos apresentam natureza cálcio-alcalina, caráter peraluminoso, e são semelhantes aos

granitos do tipo I. Os corpos intrusivos no embasamento arqueano são monzogranitos, sienogranitos e granitos a duas micas. As datações Pb-Pb em zircão desses corpos indicaram idades riacianas de 2,26-2,05 Ga (Avelar, 2002; Lafon *et al*., 2008; Barreto *et al*., 2010, 2013). As assinaturas isotópicas ε_{Nd} ($-4{,}88 < \varepsilon_{Nd} < +3{,}15$) e idades Nd T_{DM} (2,24 Ga < Nd T_{DM} < 2,84 Ga) indicam uma contribuição significativa de crosta continental arqueana na fonte dessas rochas, também evidenciada por cristais de zircão herdados de até 2,71 Ga, assim como a formação de alguns corpos a partir de magmas juvenis paleoproterozoicos. Além desses granitoides, foi identificado, na Serra do Navio, um corpo intrusivo tardi-riaciano à granada-sillimanita, com idade Pb-Pb em rocha total de 1993 ± 52 Ma (Borges *et al*., 2002).

Unidades Fanerozoicas

Diques máficos mesozoicos

Na região da Serra do Navio, como em toda a porção sudeste do Escudo das Guianas, as rochas pré-cambrianas são cortadas por enxames de diques máficos mesozoicos, denominados Cassiporé, orientados predominantemente segundo a direção N-S a NNW-SSE. Esses diques estão ligados à abertura do oceano Atlântico central e têm idades de 200-192 Ma (Deckart *et al*., 1997).

Grupo Barreiras

Os sedimentos miocênicos do Grupo Barreiras, com espessura de até algumas dezenas de metros, recobrem discordantemente as rochas do embasamento cristalino. Constituem sedimentos essencialmente clásticos, areno-argilosos, arenosos, argilo-siltosos e conglomeráticos, contendo níveis com cimento ferruginoso. São considerados de ambiente continental, de origem flúvio-lacustre, com sistema de leques aluviais e planícies fluviais e lacustres, geralmente maciços ou com estratificação incipiente. São comuns pequenas ocorrências de caulim (NATRONTEC, 2007).

Sedimentos Quaternários

Esses sedimentos recentes são depósitos aluvionares, delimitados ao longo das bacias hidrográficas que drenam a região, formando baixos e áreas alagadiças pouco espessas, na maioria das vezes em vales encaixados. Nas encostas das serras e elevações maiores encontram-se principalmente colúvios. Terraços aluviais sobrepostos às unidades inferiores são conhecidos principalmente nos rios que fluem em vales de meandros encaixados (NATRONTEC, 2007).

Lateritas

As rochas lateríticas constituem espessas capas distribuídas em todo o estado, principalmente na sua parte sul. Quatro tipos de lateritos relacionados a pelo menos duas fases de lateritização foram identificados no Amapá, sendo uma de idade terciária e outra quaternária recente (Barbour, 1966).

ATIVIDADES DE MINERAÇÃO

A mineração no estado do Amapá é exercida por empresas e garimpeiros. Na década de 1970, a procura por ouro em todo o território propiciou a descoberta de vários depósitos e, consequentemente, a implantação de vários núcleos garimpeiros nas bacias dos principais rios do estado. Contudo, a ocupação da região central amapaense se intensificou somente com a instalação do primeiro empreendimento de exploração de manganês na Serra do Navio, pela Indústria e Comércio de Minérios (ICOMI S.A.), única empresa de grande porte que atuou na região e que encerrou suas atividades em 1997.

Desde 1996, a Mineração Pedra Branca do Amapari (MPBA) desenvolve atividades de exploração, mineração e beneficiamento de ouro no município de Pedra Branca do Amapari, Amapá. Em 2004, a MPBA descobriu minério de ferro em suas áreas. A exploração das jazidas de ferro foi iniciada em 2008 pela empresa Anglo Ferrous. Devido às características semelhantes das atividades e operações e à proximidade das áreas

dos Projetos Ferro Amapá (Anglo Ferrous) e Amapari (MPBA), eles apresentam a mesma área de influência direta e afetam os igarapés William, Jornal, Taboca, Mario Cruz e Sentinela, que pertencem à sub-bacia do rio Amapari (NATRONTEC, 2007).

Além da extração de ouro e ferro, a torianita é extraída ilegalmente na região central do Amapá. No rio Cupixi, a principal atividade de mineração provinha do garimpo Água Preta, localizado no médio curso do rio, paralisado em 1986 e reativado a partir de 2003 para extração de ouro secundário. Há também na região do Cupixi outros garimpos dedicados à exploração de tantalita. Finalmente, foi também mencionada a existência de garimpos de cassiterita em graisens, associados a ortognaisses (NATRONTEC, 2007).

AMOSTRAGEM E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

COLETA DAS AMOSTRAS

A estratégia de coleta das amostras de sedimentos recentes, depositados na porção superior da margem do rio durante eventos de inundação, dependeu da ocorrência de afloramentos adequados e da acessibilidade. A coleta de 25 amostras de sedimentos de rio e da desembocadura de pequenos tributários (igarapés) ao longo do rio Amapari foi realizada durante uma campanha de campo do Projeto Folha Amapá, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM-Belém), no trecho Pedra Branca do Amapari – Porto Grande, em novembro de 2007. O acesso aos afloramentos de coleta não é possível por via terrestre e a campanha de amostragem foi realizada por barco ao longo de um percurso de aproximadamente 68 km, até as proximidades da confluência do rio Araguari. Foram amostrados também três perfis complementares de alguns rios e igarapés tributários, sendo obtidas quatro e sete amostras, respectivamente, dos rios Cachorrinho e Cupixi, da margem direita do rio Amapari, e duas amostras do igarapé Cupixizinho, da margem esquerda (Figura 2).

Não se tem nenhuma informação sobre a periodicidade e a taxa de deposição nas planícies de inundação, de tal forma que não há como saber se as amostras correspondem a um mesmo período ou idade de um afloramento para outro (Figura 3). De acordo com a disponibilidade de material nos afloramentos, uma quantidade de amostra de 60-750 g foi obtida com coletores de aço e espátulas de policloreto de polivinila (PVC).

ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

As análises granulométricas foram efetuadas no Laboratório de Sedimentologia do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA). As amostras foram desagregadas e peneiradas em peneiras de aço inox para separar as frações fina ($< 62\ \mu$m) e areia ($> 62\ \mu$m). A separação das frações argila ($< 2\ \mu$m) e silte (2-62 μm) foi realizada em cilindros de *Atterberg*, seguindo a lei de *Stokes* (Folk, 1974). Para a maioria das amostras, foi necessário um tratamento com pirofosfato de sódio (0,9 g/L) para evitar floculação.

ANÁLISES MINERALÓGICAS

A caracterização mineralógica foi realizada na fração fina ($< 62\ \mu$m) de todas as amostras; na fração de granulometria de 62-250 μm de cinco amostras; e na fração argila de uma das amostras (Lafon Amapari Sedimento – LAS01), para identificar possíveis diferenças mineralógicas entre as frações.

As amostras foram pulverizadas em gral de ágata e a composição mineralógica foi determinada no Laboratório de Difração de Raios X do IG-UFPA, segundo o método do pó (Moore & Reynolds Jr., 1997). O difratômetro de Raios-X usado foi da marca PANalytical PW3040/X0 X' Pert PRO Console, com X Celerator e tubo de anodo de cobalto. Os difratogramas foram processados com o software XPert HighScore (PANalytical) para tratamento digital dos registros, usando a base de dados Powder Diffraction File (PDF) do International Center for

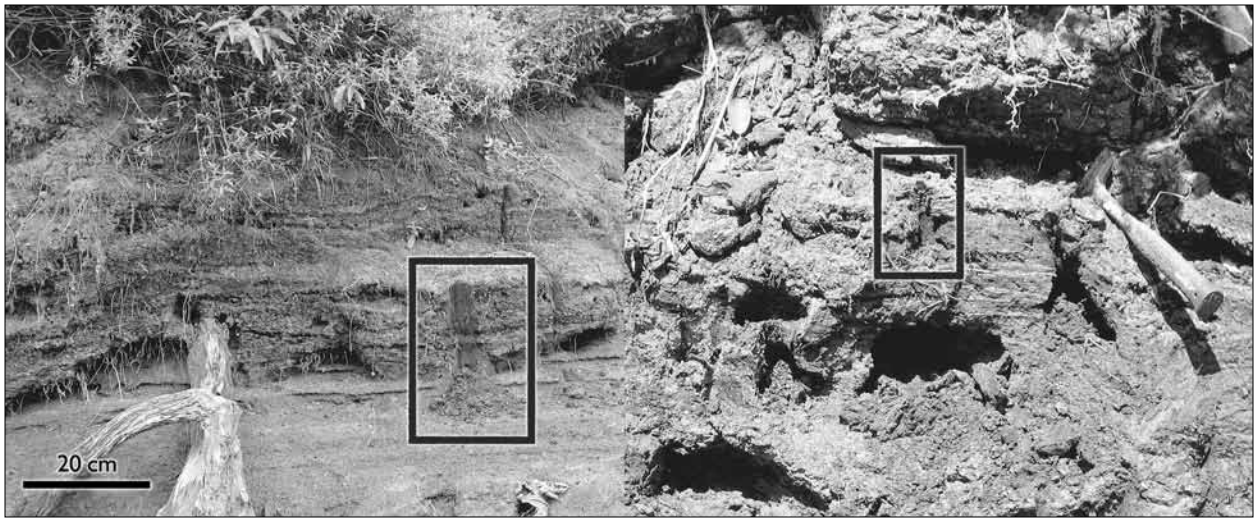

Figura 3. Fotografias de pontos de coleta (observar a delimitação em preto) de sedimentos recentes do rio Amapari. Fotos: Manoel C. C. Neto.

Diffraction Data (ICCD) para a identificação qualitativa das fases minerais.

ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas foram realizadas na fração fina de 22 amostras dos sedimentos e em oito amostras totais no laboratório comercial da Acme Analítica Laboratório (ACME). Nas oito amostras de fração total, os teores dos elementos maiores e menores foram determinados em 0,1 g de amostra por Espectrometria de Emissão Óptica e Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES e ICP-MS), respectivamente, após fusão com metaborato e tetraborato de lítio e digestão com ácido nítrico diluído. Para o controle analítico, foi utilizado o padrão SO 18. Para a fração fina, 0,25 g de amostra foram analisadas por espectrometria de massa ICP-MS, após dissolução total com uma mistura HNO_3-$HClO_4$-HF a quente, seguida de HCl. O procedimento de controle analítico da ACME incluiu análises em duplicata da amostra LAS10 e a análise dos padrões DST6 e OREAS24P.

ANÁLISES ISOTÓPICAS

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório Pará-Iso do IG-UFPA, por dissolução total (20 amostras) e em cinco amostras por lixiviação, a fim de identificar eventuais diferenças na composição isotópica de Pb trocável e do Pb presente na estrutura dos minerais.

A digestão ácida total de aproximadamente 1 g de amostra foi realizada em cadinhos de teflon com 5 ml de HF (48%), seguido de água régia 1:1 (HCl + HNO_3). Após evaporação, o resíduo foi dissolvido com 5 ml de HBr 8N e as amostras foram novamente evaporadas a 100 °C.

A lixiviação ácida foi realizada em 500 mg de fração fina com HNO_3 5N, durante 24 horas. Após centrifugação, uma alíquota de 3 ml de sobrenadante foi evaporada, dissolvida com 5 ml de HBr 8N e evaporada novamente.

A concentração e purificação do Pb dos produtos de lixiviação e de dissolução total foi realizada por cromatografia de troca iônica em meios HBr 0,5N e HCl 6N, com resinas tipo DOWEX AG1x8®, 200-400 mesh, em microcolunas de teflon. A solução de Pb purificado foi evaporada após introdução de 20 μL de H_3PO_4 0,125N (Lafon *et al*., 1993).

O Pb foi depositado com solução de silicagel em um filamento de Re purificado e previamente desgaseificado. As análises isotópicas foram realizadas em modo estático, com um espectrômetro de massa por ionização térmica Finnigan MAT262, com multicoletores. As razões isotópicas

foram corrigidas do fracionamento, utilizando um fator de 0,12 ± 0,03%, determinado a partir de análises repetidas do padrão NBS 982 '*Equal Atom*'. Os brancos de química sempre foram inferiores a 0,05% da quantidade de Pb das amostras, e não tiveram influência sobre os resultados isotópicos. O tratamento dos dados isotópicos em diagramas isocrônicos foi realizado com o programa Isoplot/Ex v.3.10b (Ludwig, 2004).

RESULTADOS

ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS E MINERALÓGICAS

Todas as amostras são sedimentos arenosos (> 75% de fração areia), exceto a amostra LAS18, que constitui uma areia síltica. As percentagens de fração fina (silte + argila) variaram significativamente de 1,2% até 32,2% do total da amostra (Tabela 1). As amostras do rio Cupixi evidenciaram maior homogeneidade granulométrica quando comparadas às do rio Amapari e dos outros tributários (9,2% < fração fina < 14,5%). As percentagens de argila e silte na fração fina apresentam grandes variações, de 68,4% até 99,85% e de 0,2% até 31,65%, respectivamente, sendo sempre a fração silte predominante. Contudo, não foi estabelecida nenhuma relação entre percentagens de argila e silte e localização das amostras.

A composição mineralógica das 25 amostras é muito semelhante, tanto na fração fina quanto na fração de 62-250 μm, destacando-se quartzo, gibbsita, muscovita e caulinita (Tabela 2). O rutilo e/ou o diásporo foram detectados em várias amostras (LAS12, LAS13, LAS15, LAS22, LAS23 e LAS25). O microclínio foi identificado na fração fina das amostras LAS11 e LAS21. Esfalerita ferrosa e ramsdelita estão presentes na fração 62-250 μm e faujasita na fração fina da amostra LAS16. Na amostra LAS01, identificou-se montmorillonita na fração 62-250 μm. O anatásio, a calcita e a cummingtonita manganesífera estão presentes na fração fina das amostras LAS05, LAS09 e LAS11, respectivamente. As amostras LAS11 e LAS24 foram as únicas que apresentaram a vermiculita, e a amostra LAS25, o clinocloro. As amostras LAS19 e LAS21, provenientes do rio Amapari, são compostas apenas de quartzo e caulinita, além de diásporo na amostra LAS19 e de microclínio na amostra LAS21.

ANÁLISES GEOQUÍMICAS

Os teores dos metais pesados de U, Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Fe total) na amostra total e na fração fina dos sedimentos recentes coletados no rio Amapari e tributários estão representados na Tabela 3.

Teores de metais pesados

As amostras de sedimentos, tanto na amostra total quanto na fração fina, apresentam grandes variações de teores dos metais pesados Pb, Cu, Zn, Ni, Mn e Cr (Figura 4). Apesar das grandes variações observadas entre os pontos de amostragem, oito das amostras analisadas – tanto em amostra total quanto na fração fina – apresentam comportamento geoquímico similar, ou seja, os padrões de variação dos metais pesados presentes na fração fina dessas amostras são semelhantes aos da respectiva fração total, porém com a concentração sendo maior na fração fina (Figura 4).

Os teores mais elevados são encontrados nas amostras LAS06, LAS18, LAS20 (rio Amapari), LAS08 (igarapé Cupixizinho), LAS17 (rio Cupixi) e LAS24 (rio Cachorrinho), e os teores mais baixos nas amostras LAS05, LAS07, LAS10, LAS19, LAS21 (rio Amapari), LAS09 (igarapé Cupixizinho), LAS14 (rio Cupixi), LAS22 e LAS25 (rio Cachorrinho). Observam-se, nas amostras LAS06 e LAS18 (rio Amapari), valores bem mais elevados em relação aos encontrados nos demais pontos de coleta do rio Amapari.

Os teores de metais no rio Amapari tendem a aumentar na direção da jusante, isto é, a amostra LAS01 apresenta teores de metais significativamente mais elevados do que os da amostra LAS21. O mesmo comportamento

Tabela 1. Percentagem das diversas frações granulométricas das amostras de sedimentos do rio Amapari e tributários. Legenda: na = não analisado.

Amostra	Frações granulométricas (%)			
	> 62 μm	< 62 μm (fração fina)	% do silte e argila na fração fina	
			2-62 μm (silte)	< 2 μm (argila)
Rio Amapari				
LAS04	91,95	8,05	99,21	0,79
LAS10	91,16	8,84	90,91	9,09
LAS18	67,83	32,17	88,65	11,35
LAS19	98,82	1,18	na	na
LAS20	82,67	17,33	68,38	31,62
LAS21	95,76	4,24	99,83	0,17
Rio Amapari (desembocadura de igarapés)				
LAS01	89,45	10,55	76,23	23,77
LAS02	80,75	19,25	87,85	12,15
LAS03	80,94	19,06	80,45	19,55
LAS05	85,09	14,91	83,53	16,47
LAS06	95,46	4,54	96,50	3,50
LAS07	86,25	13,75	95,24	4,76
Rio Cupixi				
LAS11	90,80	9,20	98,90	1,10
LAS12	90,75	9,25	83,06	16,94
LAS13	88,05	11,95	93,02	6,98
LAS14	90,97	9,03	98,47	1,53
LAS15	85,61	14,39	89,09	10,91
LAS16	85,50	14,50	71,43	28,57
LAS17	89,07	10,93	84,85	15,15
Rio Cachorrinho				
LAS22	91,65	8,35	97,60	2,40
LAS23	88,53	11,47	88,69	11,31
LAS24	79,43	20,57	92,31	7,69
LAS25	74,96	25,04	95,76	4,24
Igarapé Cupixizinho				
LAS08	85,91	14,09	80,65	19,35
LAS09	86,18	13,82	97,48	2,52

é observado para as amostras do rio Cupixi. O igarapé Cupixizinho e o rio Cachorrinho mostram uma tendência contrária: nessas drenagens, há uma diminuição dos teores de metais em direção à jusante (Figura 5).

Tabela 2. Paragênese mineral das amostras de sedimentos do rio Amapari e tributários na fração fina e fração de 62-250 μm. Os números em arábico representam as amostras (LAS). Legendas: Amostras sem asterisco = análise mineralógica na fração fina (< 62 μm); * = análise mineralógica na fração 62-250 μm; ** = análise mineralógica na fração < 2 μm.

Mineral	Amostragem (LAS)																													
	Rio Amapari								Rio Amapari (desembocadura de igarapés)								Rio Cupixi								Rio Cachorrinho					Igarapé Cupixizinho	
	4	10*	10	18*	18	19	20	21	1*	1**	1	2	3	5	6	7	11	12	13	14	15	16*	16	17	22	23	24	25*	25	8	9
Quartzo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Caulinita	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Muscovita		X	X	X	X		X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gibbsita	X	X	X	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rutilo	X	X	X						X		X					X		X							X	X			X		X
Diásporo			X			X									X				X		X	X							X		
Clinocloro				X					X		X		X									X						X	X		
Vermiculita												X				X	X										X	X			
Faujasita																							X								
Microclínio								X																							
Calcita																															X
Anatásio														X																	
Cummingtonita manganesífera																	X														
Montmorillonita									X																						
Esfalerita ferrosa																						X									
Ramsdelita																						X									

Teores de Al e Fe e correlações com metais pesados

Assim como foi observado nos metais pesados, os teores de Al e Fe na amostra total e na fração fina têm um comportamento semelhante entre si, ou seja, quando lançadas em diagramas de concentrações *versus* os pontos de amostragem, as concentrações em ambas as frações mostram a mesma tendência (Figura 4). No rio Amapari, os teores de Fe aumentam em direção à jusante e mostram teores elevados para as amostras LAS18 e LAS06, assim como foi observado com os metais pesados. Para o Al, o aumento de teor em direção à jusante não foi observado e não foram encontrados teores elevados nas amostras LAS06 e LAS18. As amostras LAS19 e LAS21 apresentam, por sua vez, baixos teores de Al em relação às outras amostras (Figura 5). Os teores mais baixos de Fe foram encontrados também nessas duas amostras. Isso é explicado pelo fato de serem compostas essencialmente por quartzo e caulinita (Tabela 2). Para as amostras dos tributários, o comportamento dos teores de Al e Fe é similar àquele observado para os metais pesados (Figuras 4 e 5).

O Al e o Fe geralmente apresentam comportamento geoquímico que os caracteriza como elementos imóveis. Portanto, foi feita uma correlação entre as suas

Tabela 3. Teores de metais pesados, U, Al_2O_3 e Fe_2O_3 da amostra total e fração fina dos sedimentos do rio Amapari e tributários. Na amostra total, os teores de Mn e Cr foram calculados a partir das percentagens dos óxidos. Para a fração fina, Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram calculados a partir das percentagens de Al e Fe. Legenda: * = concentração na amostra total.

(Continua)

Amostra/metal/óxidos	Pb (mg kg^{-1})	Cu (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})	Ni (mg kg^{-1})	Mn (mg kg^{-1})	Cr (mg kg^{-1})	U (mg kg^{-1})	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)
Rio Amapari									
LAS04*	7,8	2,3	4	2,1	155	17,1	2,9	5,14	0,71
LAS04	38,6	35,7	77	29,3	503	79	8,1	40,93	3,49
LAS10	38,1	13,8	58	53,2	167	129	6,1	35,79	2,95
LAS18	97,7	226,2	251	309,5	>10000	248	5,9	21,58	3,63
LAS19	44,7	13,9	29	8,8	1080	20	8,8	20,33	4,35
LAS20*	34,9	31,8	52	32,1	1239	65	6,7	21,59	4,39
LAS20	51,9	40,1	95	57,1	1416	120	6,4	32,95	11,64
LAS21	42,2	5,3	14	3,8	295	10	16,1	38,92	17,21
Rio Amapari (desembocadura de igarapés)									
LAS01*	41,9	51,9	83	53,8	18586	89	6,8	22,62	7,62
LAS01	63,3	69,2	139	96,7	2043	197	7,3	39,23	15,67
LAS02	57,5	53,2	123	99,8	>10000	143	8	34,65	11,04
LAS03	55,5	43,4	85	65,3	565	157	6,2	39,95	4,98
LAS05	49	31,7	61	55,1	280	146	5,4	27,97	19,39
LAS06*	49	78,4	121	124,2	39496	61,6	4,4	9,85	7,68
LAS06	49	135,7	264	200,2	>10000	180	8,5	28,34	10,69
LAS07	49	57,6	136	86,9	2001	141	7,7	36,96	25,19
Rio Cupixi									
LAS12*	6,2	0,6	3	1,2	155	17,1	3,9	4,1	0,64
LAS12	35,7	11,8	52	23,7	438	82	12,4	35,41	26,39
LAS14	42	12,9	55	28,3	595	111	13,1	4,27	1,72
LAS16	63,9	72,1	156	99,8	2375	147	8,9	31,59	7,69
LAS17*	31,7	42,6	55	86,5	19283	78,7	5,7	16,15	6,04
LAS17	66,8	99,8	165	166,7	>10000	212	6,8	8,35	1,52
Rio Cachorrinho									
LAS22	43,5	9,1	28	8,5	201	24	10,5	24,45	1,54
LAS23	82,2	50,9	143	47,7	2373	156	12,2	31,93	27,65
LAS24*	52,4	91,6	81	92,7	2401	109,5	6,9	26,74	8,88
LAS24	68	108,2	148	137,9	2325	240	6,2	35,37	16,61
LAS25	49,4	39,5	100	52	1264	106	7,4	27,81	6,81
Igarapé Cupixizinho									
LAS08*	59,5	144,9	156	205,3	68149	112,9	6,2	22,28	12,17

Tabela 3. (Conclusão)

Amostra/metal/óxidos	Pb (mg kg^{-1})	Cu (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})	Ni (mg kg^{-1})	Mn (mg kg^{-1})	Cr (mg kg^{-1})	U (mg kg^{-1})	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)
LAS08	79,2	160,8	209	237,4	>10000	230	6,5	21,47	4,29
LAS09	38,5	12,1	52	31,8	534	107	12,6	27,25	3,66

concentrações e a dos metais pesados nos sedimentos. Os metais pesados não apresentaram correlações com Al_2O_3 (Figura 6), como demonstram os baixos valores dos coeficientes de correlação (r^2 inferior a 0,3), com exceção do Cr ($r^2 = 0,62$). As amostras do rio Amapari, com baixos teores de Fe e Al e com paragênese mineral mais simples (LAS19 e LAS21), destacam-se nos diagramas da Figura 6. Sem essas amostras, os coeficientes de correlação são menores que 0,22 para Pb, Cu, Zn, Ni e Mn, e de 0,44 para o Cr. Contudo, as correlações entre Fe_2O_3 e metais pesados se mostraram excelentes (Figura 7). Os coeficientes de correlação para esses elementos aproximam-se de 0,9, com exceção do Cr ($r^2 = 0,64$). Em todas as amostras, o Pb apresentou um valor de $r^2 = 0,90$. Para Cu, Ni e Mn, o cálculo do coeficiente de correlação, sem a amostra LAS23, forneceu valores de 0,92, 0,93 e 0,82, respectivamente, e para o Zn, um valor de 0,94, sem as amostras LAS06 e LAS23 (Figura 6).

TEORES DE U E COMPOSIÇÕES ISOTÓPICAS DE Pb

As razões isotópicas de Pb apresentam variações importantes (Tabela 4), sendo inferiores e superiores ao valor médio aceito para a assinatura isotópica média atual do Pb geogênico da crosta terrestre ($^{206}Pb/^{204}Pb \approx 18,59$, $^{207}Pb/^{204}Pb \approx 15,59$ e $^{208}Pb/^{204}Pb \approx 39,56$; Allègre, 2008).

As variações da razão $^{206}Pb/^{204}Pb$ no rio Amapari ($17,11 < {}^{206}Pb/^{204}Pb < 24,56$), rio Cupixi ($17,84 < {}^{206}Pb/^{204}Pb < 29,83$), rio Cachorrinho ($18,01 < {}^{206}Pb/^{204}Pb < 22,50$) e no igarapé Cupixizinho ($17,51 < {}^{206}Pb/^{204}Pb < 19,81$) são da mesma ordem de grandeza. A variação do igarapé Cupixizinho foi menor, porém sua representatividade é prejudicada por terem sido analisados apenas dois pontos. Para a razão isotópica $^{208}Pb/^{204}Pb$, variações importantes foram também registradas (Tabela 4), desde valores abaixo da média atual até valores toriogênicos: rio Amapari ($36,24 < {}^{208}Pb/^{204}Pb < 46,69$); rio Cupixi ($37,20 < {}^{208}Pb/^{204}Pb < 48,21$); igarapé Cupixizinho ($36,77 < {}^{208}Pb/^{204}Pb < 41,15$); rio Cachorrinho ($36,70 < {}^{208}Pb/^{204}Pb < 40,12$). Não foram encontradas diferenças significativas de composição isotópica de Pb de dissolução total e de lixiviação.

Tendo em vista as variações significativas de composição isotópica do Pb e a tendência dos pontos analíticos a se organizarem em arranjos lineares quando lançados em diagramas isotópicos, foram realizados cálculos de idades a partir de todas as amostras, separando-se as amostras dos tributários do rio Amapari (Figura 8). As amostras do rio Amapari e tributários forneceram uma isócrona com valor de 2169 ± 140 Ma e MSWD de 14. A eliminação da amostra LAS06, que se afasta visualmente do alinhamento das outras amostras, produziu um valor de 2191 ± 100 Ma, com MSWD de 8,5 (Figura 8A). Para as dez amostras do rio Amapari, excluindo a amostra LAS06, foi obtida uma isócrona com idade de 1964 ± 88 Ma e baixo valor de MSWD de 1,6, indicando um excelente alinhamento (Figura 8B). Para o rio Cachorrinho, quatro pontos analíticos definiram valor de 1837 ± 1400 Ma e MSWD de 13 (Figura 8C). Embora com um erro extremamente elevado, a idade não é significativamente diferente das outras idades calculadas. Para as amostras do rio Cupixi, o cálculo da isócrona forneceu uma idade de 2261 ± 150 Ma e MSWD = 8,1 (Figura 8D). Finalmente, para o igarapé

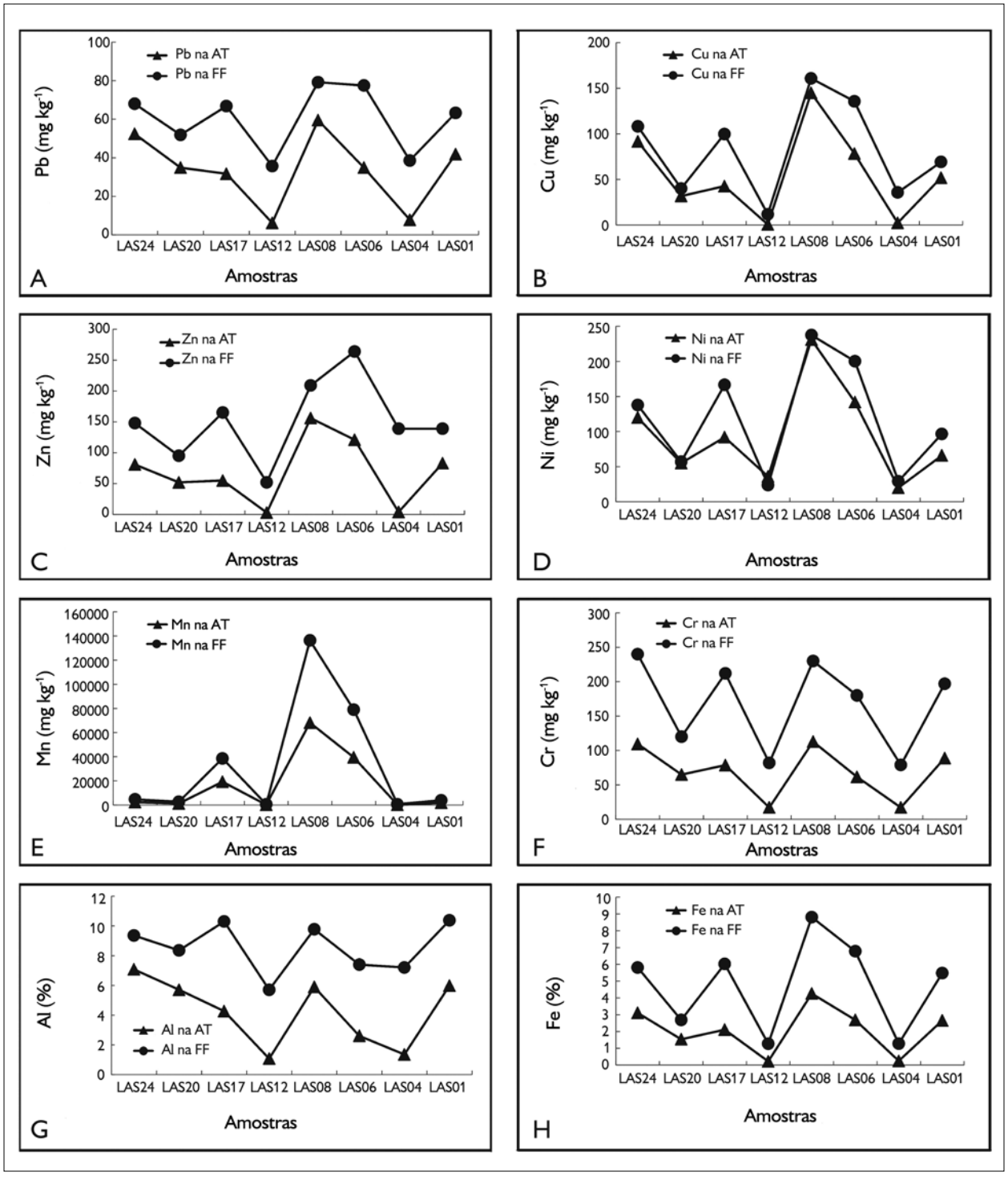

Figura 4. Comparação entre os teores de metais pesados, Fe e Al da Amostra Total (AT) e Fração Fina (FF) em sedimentos do rio Amapari (LAS01, LAS04, LAS06 e LAS20), rio Cupixi (LAS12 e LAS17), rio Cachorrinho (LAS24) e igarapé Cupixizinho (LAS08). Diagramas: (A) Pb; (B) Cu; (C) Zn; (D) Ni; (E) Mn; (F) Cr; (G) Al e (H) Fe.

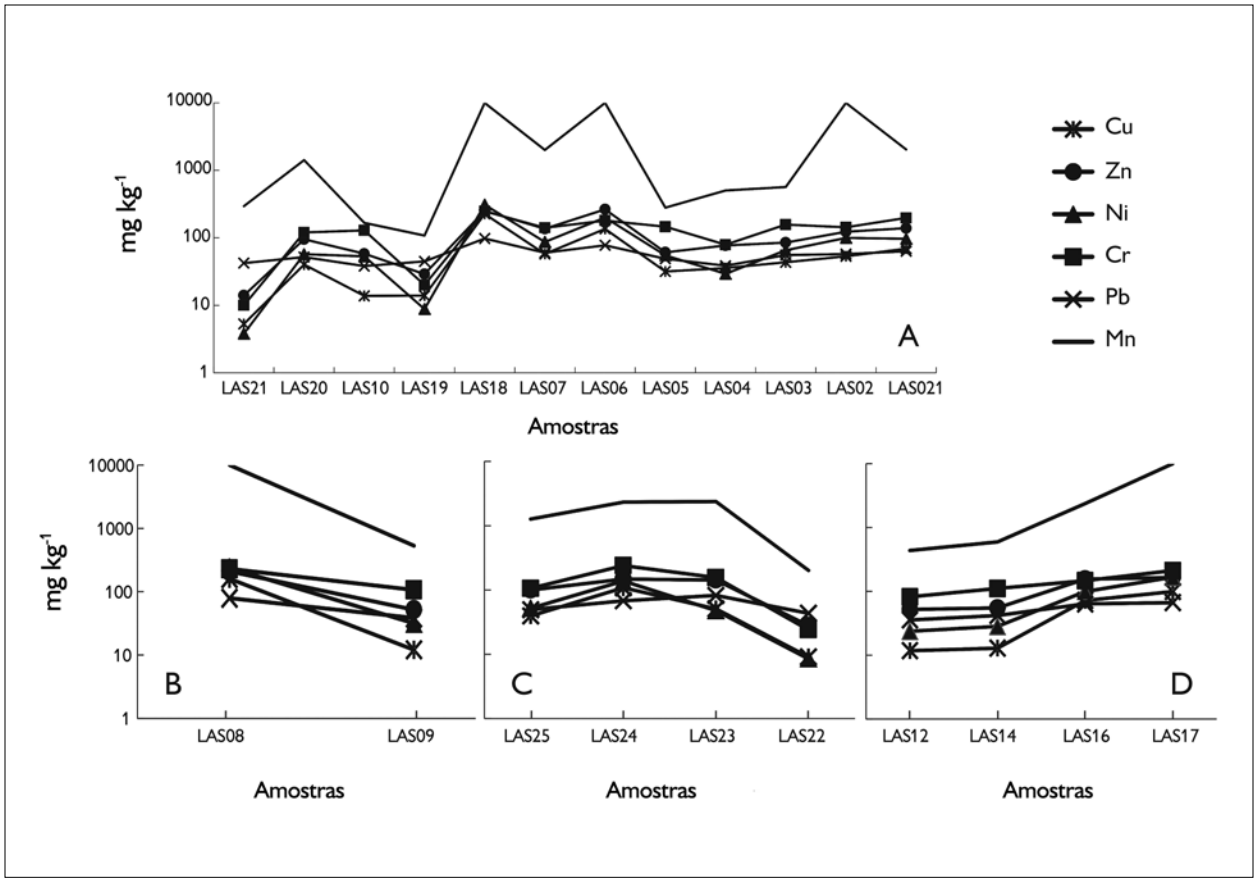

Figura 5. Distribuição dos teores de Cu, Zn, Ni, Cr, Pb e Mn na fração fina dos sedimentos ao longo das drenagens: (A) rio Amapari; (B) igarapé Cupixizinho; (C) rio Cupixi e (D) rio Cachorrinho.

Cupixizinho, os dois pontos amostrados forneceram uma idade de 1660 ± 430 Ma. O erro analítico sobre a idade é bastante elevado devido à pequena variação das razões isotópicas de Pb dos dois pontos.

No diagrama U *versus* Pb, os teores de U e Pb não mostram correlação, com coeficiente r^2 igual a 0,14 (Figura 9A). Nos diagramas da razão $^{206}Pb/^{207}Pb$ *versus* U e da razão $^{206}Pb/^{207}Pb$ *versus* Pb, as correlações não foram boas, com valor de $r^2 = 0,51$ para ambos os coeficientes de correlação (Figuras 9B e 9C). Por outro lado, a correlação das razões $^{206}Pb/^{207}Pb$ e U/Pb foi boa, sobretudo quando eliminadas duas amostras do igarapé Cupixizinho (LAS09) e do rio Cupixi (LAS12), com um coeficiente de correlação $r^2 = 0,93$ (Figura 9D).

INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os sedimentos do rio Amapari e tributários apresentam uma granulometria arenosa e predominância de silte na fração fina. A paragênese mineral é constituída por quartzo, caulinita, muscovita e gibbsita. Os outros minerais identificados (anatásio, rutilo, diásporo, clinocloro, microclínio etc.) representam relíquias das paragêneses primárias, não destruídas durante o intemperismo/transporte.

A composição química dos sedimentos é bastante heterogênea, com grandes variações dos teores de metais de uma amostra para outra. Entretanto, quando uma amostra apresenta enriquecimento em um determinado metal pesado, os demais também se apresentam enriquecidos.

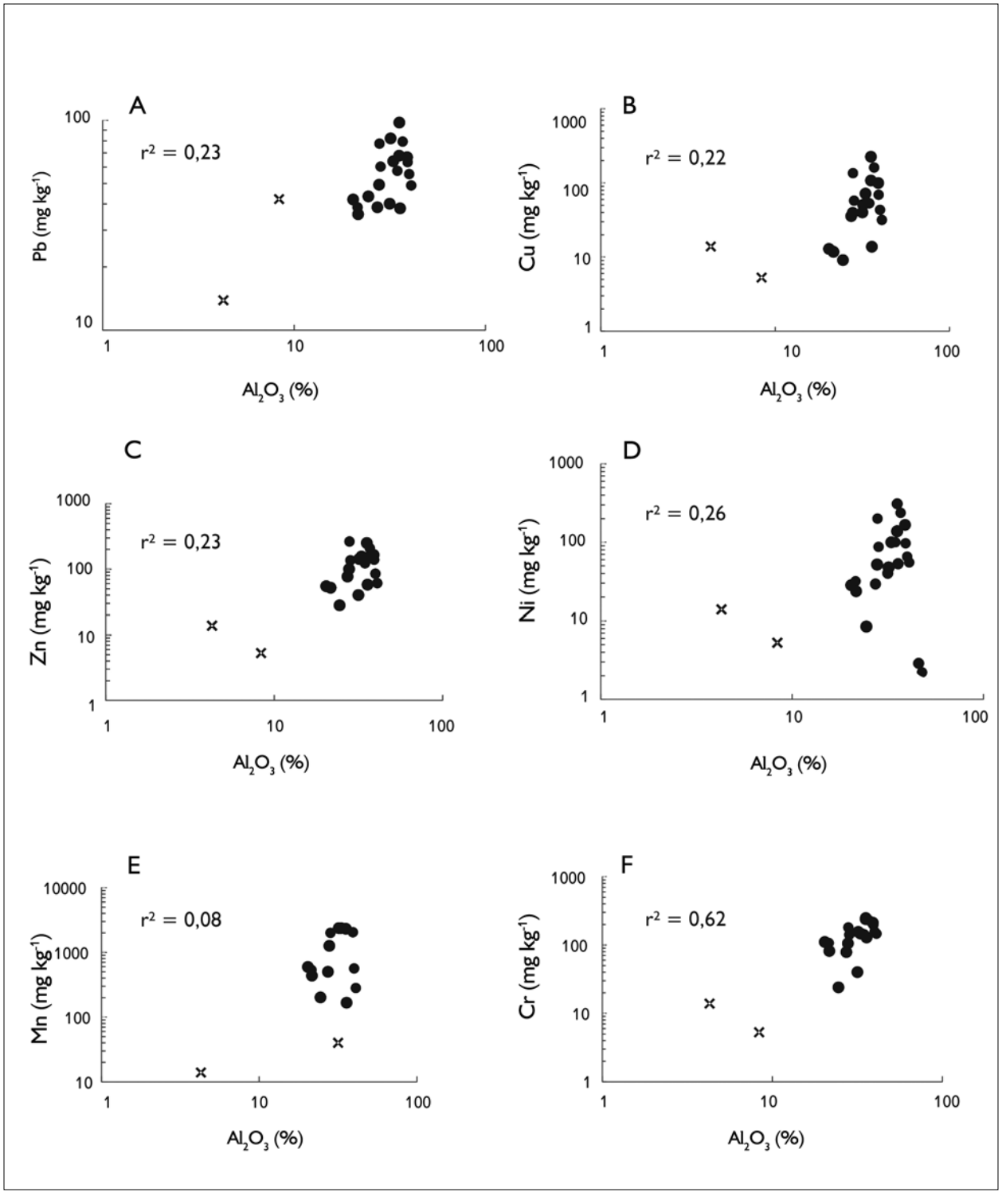

Figura 6. Diagramas de correlação entre percentagens de Al_2O_3 e teores dos metais pesados em mg kg^{-1}: (A) Pb; (B) Cu; (C) Zn; (D) Ni; (E) Mn e (F) Cr da fração fina. Legenda: x = pontos excluídos do cálculo de coeficiente de correlação.

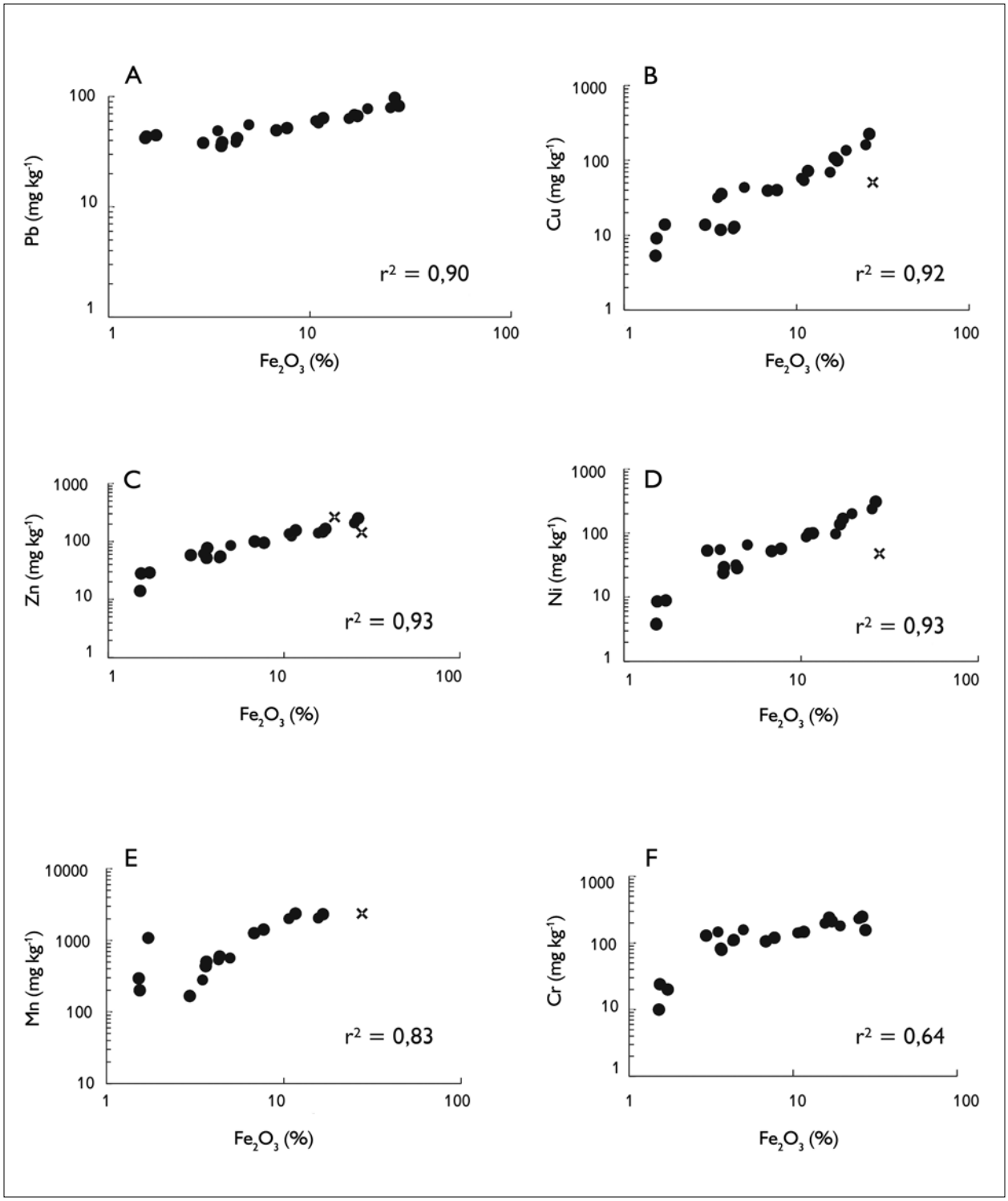

Figura 7. Diagramas de correlação entre percentagens de Fe_2O_3 e teores dos metais pesados em mg kg^{-1}: (A) Pb; (B) Cu; (C) Zn; (D) Ni; (E) Mn; (F) Cr da fração fina. Legenda: x = pontos excluídos do cálculo de coeficiente de correlação.

RELAÇÃO ENTRE GEOQUÍMICA DOS METAIS E MINERALOGIA

A paragênese mineral é constituída por quartzo, caulinita, muscovita e gibbsita, tanto na fração fina quanto na fração granulométrica mais grosseira. É fato conhecido que esses minerais têm capacidade limitada em acolher os metais pesados (Windom *et al*., 1989). Os minerais reliquiares, por seus baixos conteúdos modais, não influenciam os teores dos metais pesados investigados. Alguns minerais, como a cummingtonita manganesífera, a esfalerita e a ramsdelita, poderiam ter contribuído para os teores de Mn ou Zn, porém não foram detectados teores maiores desses metais nas amostras onde esses minerais foram identificados em relação às outras amostras, mostrando que eles não são preponderantes. A vermiculita, cuja capacidade de troca iônica é mais elevada se comparada à paragênese principal dos sedimentos, foi identificada nas amostras LAS02, LAS07, LAS11 e LAS24 (fração fina), e LAS25 (fração > 62 μm), porém não provocou nessas amostras um aumento de teores de metais em relação às demais.

Os teores de Al e Fe foram elevados para a maioria das amostras, sendo que os de Al não oscilam tanto como os valores de Fe e de metais pesados. Não existe correlação entre Al e os metais pesados, ao contrário do que normalmente é observado quando as argilas têm um papel preponderante (Schropp *et al*., 1990). Essa constatação é compatível com o fato de não ter sido encontrada correlação entre percentagem de fração argila, na qual esses minerais se concentram, e os teores de metais.

Por outro lado, os metais pesados mostraram uma boa correlação com o Fe, o qual pode ocorrer na forma de compostos amorfos ou pobremente cristalizados, uma vez que não foram identificados minerais deste elemento nas análises por difração de raios X, apesar de as concentrações de Fe serem elevadas. Uma explicação similar pode ser proposta para o Mn, que se mostrou muito enriquecido em algumas das amostras, sem a presença de minerais de Mn.

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS METAIS

Os teores de metais variaram de forma bastante significativa, de acordo com a distribuição geográfica, porém aparentemente aleatória ao longo do rio Amapari. Observam-se grandes variações em determinados pontos, como o ponto LAS18, localizado no meio do percurso estudado do rio Amapari. Isso provavelmente se deve às variações naturais ou sazonais na dinâmica desse rio para o transporte dos sedimentos, fontes de sedimentos localmente enriquecidas em metais ou, ainda, a possibilidade de as amostras serem representativas de diferentes épocas entre um ponto de coleta e outro, já que não há controle sobre o período de deposição dos sedimentos. Apesar disso, a tendência ao aumento dos teores de metais em direção à jusante sugere que o rio Amapari está sofrendo um efeito cumulativo, provavelmente pela contribuição sucessiva dos diversos tributários.

Nos tributários do rio Amapari, o padrão de distribuição dos teores dos metais analisados difere daquele do próprio rio Amapari. Entretanto, as variações de teores ficam no mesmo intervalo que o das amostras do curso do rio Amapari, pelo menos no caso do rio Cupixi e igarapé Cupixizinho. Quanto às amostras do rio Cachorrinho, não foram encontrados os valores extremos observados nos outros tributários e no rio Amapari, mas os teores também variam significativamente e são elevados. Encontrou-se um padrão relativamente linear para a evolução dos teores de metais em direção à jusante. Entretanto, esse comportamento apresenta uma evolução crescente ou decrescente dos teores de montante a jusante em função do tributário investigado, o que deve ser interpretado como representando oscilações naturais locais da composição química dos sedimentos.

ISÓTOPOS DE Pb E PROVENIÊNCIA DOS SEDIMENTOS

As variações da assinatura isotópica de Pb nos sedimentos refletem também a heterogeneidade deles, como foi observado na composição química dos metais pesados.

Tabela 4. Composições isotópicas de Pb para as amostras de sedimentos do rio Amapari e tributários. Legendas: * = não foram obtidas análises químicas nas amostras LAS11, LAS13 e LAS15; ** = as amostras LAS01, LAS06, LAS09 e LAS12 foram lixiviadas e as demais amostras sofreram abertura total; *** = na amostra LAS18 foram realizadas lixiviação ácida e abertura total.

Amostra	$^{206}Pb/^{204}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{204}Pb$	1σ	$^{208}Pb/^{204}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{206}Pb/^{207}Pb$
Rio Amapari								
LAS04	21,17	0,02	16,10	0,02	41,32	0,07	0,76	1,32
LAS10	20,34	0,02	16,02	0,02	39,63	0,06	0,79	1,27
LAS18 (lixiviação ácida)***	17,11	0,01	15,66	0,02	36,24	0,06	0,92	1,09
LAS18 (abertura total)***	17,40	0,01	15,67	0,02	36,72	0,06	0,90	1,11
LAS20	19,28	0,02	15,86	0,02	38,89	0,06	0,82	1,21
LAS21	24,50	0,02	16,52	0,02	46,69	0,08	0,67	1,48
Rio Amapari (desembocadura de igarapés)								
LAS01**	18,37	0,02	15,78	0,02	38,11	0,06	0,86	1,16
LAS02	18,91	0,02	15,84	0,02	38,76	0,06	0,84	1,19
LAS03	19,02	0,02	15,82	0,02	38,63	0,06	0,83	1,20
LAS05	19,22	0,02	15,85	0,02	38,62	0,06	0,83	1,21
LAS06**	17,93	0,02	15,92	0,02	37,94	0,06	0,89	1,13
LAS07	19,36	0,06	15,94	0,03	38,94	0,08	0,82	1,21
Rio Cupixi								
LAS11*	29,83	0,02	17,43	0,02	48,21	0,08	0,58	1,71
LAS12**	20,32	0,02	16,07	0,02	39,87	0,06	0,79	1,26
LAS13*	21,87	0,02	16,19	0,02	41,25	0,07	0,74	1,35
LAS14	23,01	0,02	16,42	0,02	42,29	0,07	0,71	1,40
LAS15*	18,04	0,01	15,75	0,02	37,20	0,06	0,87	1,15
LAS16	19,29	0,02	15,86	0,02	38,79	0,06	0,82	1,22
LAS17	17,84	0,01	15,74	0,02	37,37	0,06	0,88	1,13
Rio Cachorrinho								
LAS22	22,50	0,02	16,24	0,02	41,15	0,07	0,72	1,39
LAS23	19,35	0,02	15,99	0,02	36,77	0,06	0,83	1,21
LAS24	18,01	0,01	15,72	0,02	37,17	0,06	0,87	1,15
LAS25	19,38	0,02	15,94	0,02	39,40	0,07	0,82	1,22
Igarapé Cupixizinho								
LAS08	17,51	0,01	15,69	0,02	36,70	0,06	0,90	1,12
LAS09**	19,81	0,02	15,92	0,02	40,12	0,08	0,80	1,24

Contudo, essas composições isotópicas apresentaram bom alinhamento nos diagramas $^{207}Pb/^{204}Pb$ e $^{206}Pb/^{204}Pb$, o que indica um comportamento não aleatório dos isótopos de Pb, sugerindo que os sedimentos guardariam as assinaturas dos protólitos. Ao contrário do que se observa geralmente em sedimentos de fundo de ambientes estuarinos ou de lagos e rios com menos energia, nos quais as composições isotópicas do Pb geogênico variam em um intervalo restrito

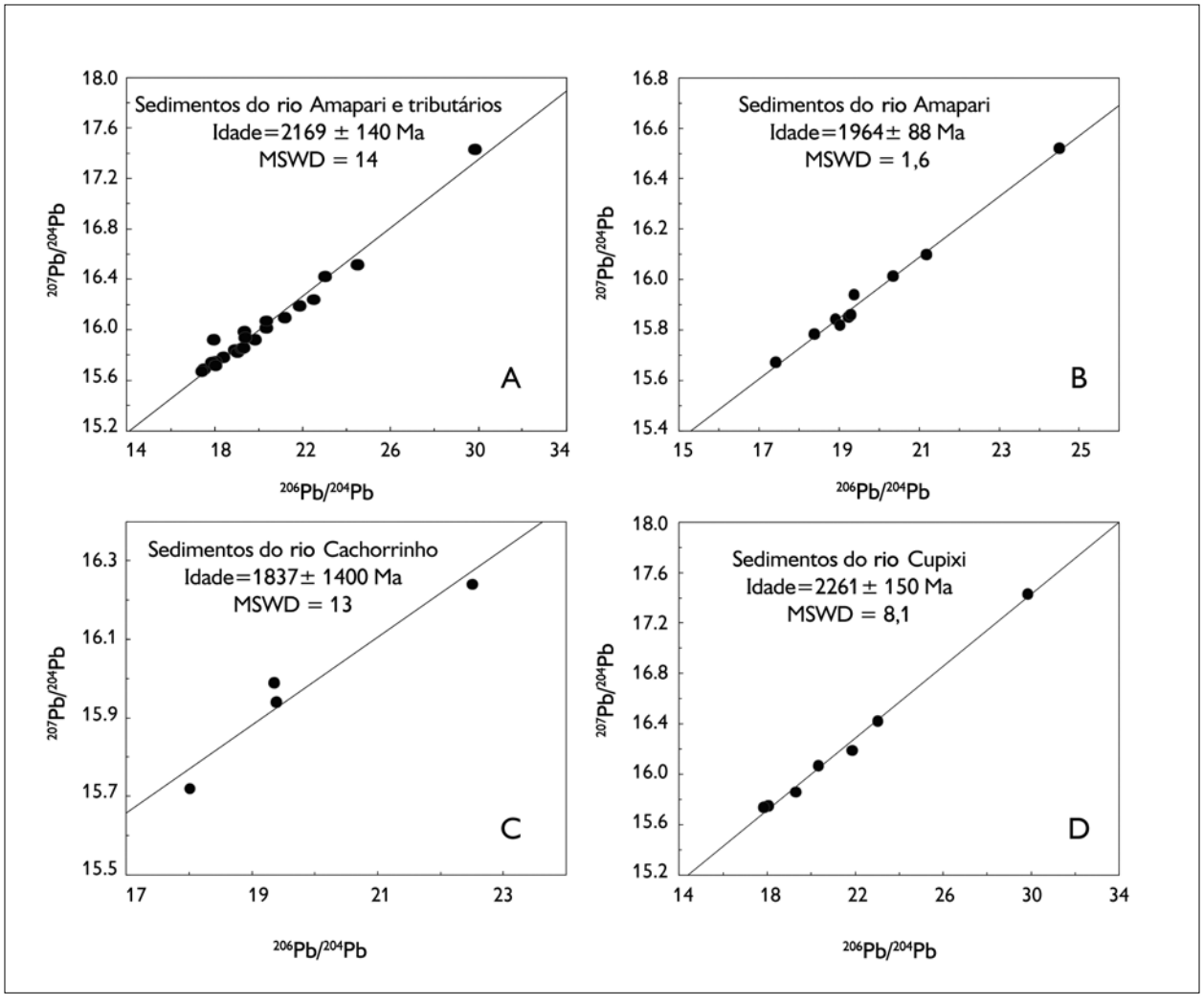

Figura 8. Diagramas isocrônicos $^{207}Pb/^{204}Pb$ *versus* $^{206}Pb/^{204}Pb$ dos sedimentos: (A) rio Amapari e tributários, sem a amostra LAS06; (B) rio Amapari, sem a amostra LAS06; (C) rio Cachorrinho; (D) rio Cupixi.

(por exemplo, Bentahila *et al*., 2006; Gioia *et al*., 2006; Komárek *et al*., 2008; Cunha *et al*., 2009; Oskierski *et al*., 2009; Cheng & Hu, 2010), as variações desses isótopos observadas nos sedimentos do rio Amapari e tributários foram muito importantes ($1{,}09 < {}^{206}Pb/^{207}Pb < 1{,}71$), mesmo nas amostras coletadas mais à jusante do rio Amapari, as quais mostraram valores entre 1,16 e 1,32.

O valor de MSWD = 1,6 para a isócrona Pb-Pb dos sedimentos do rio Amapari mostra que o alinhamento não era fortuito e que a idade de 1964 ± 88 Ma deve, portanto, corresponder à idade das unidades geológicas do final do Riaciano e início do Orisiriano que foram erodidas e serviram de fontes aos sedimentos. Essas unidades são, provavelmente, as formações supracrustais do Grupo Vila Nova e os granitoides paleoproterozoicos associados, hospedeiras das principais mineralizações metalíferas e com idades variando entre 2,26 Ga e 1,99 Ga (Borges *et al*., 2002; Lafon *et al*., 2008; Tavares, 2009; Barreto *et al*., 2010). Por outro lado, as unidades do embasamento arqueano não contribuíram para o Pb dos

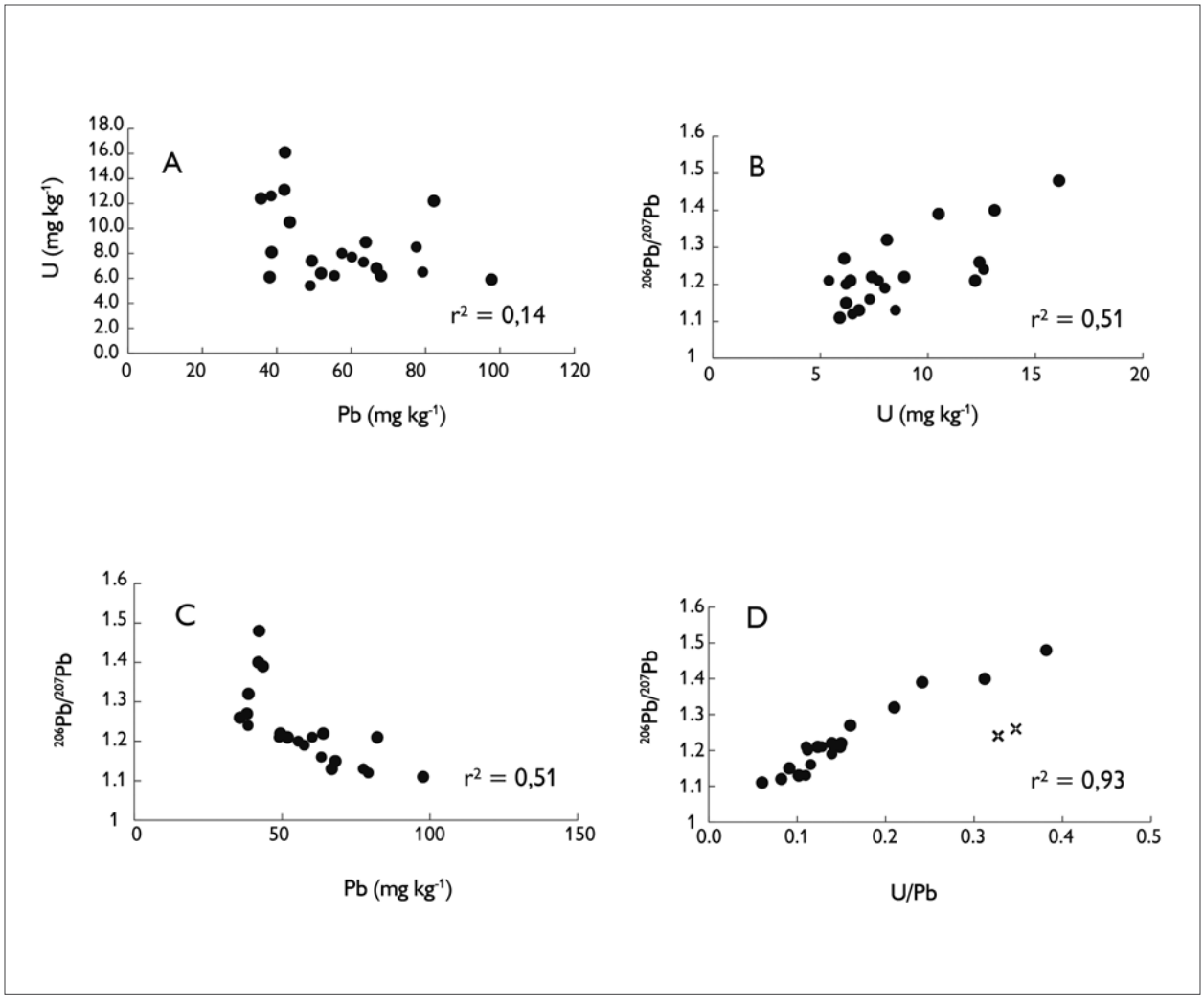

Figura 9. Diagrama de correlação entre teores de U, Pb, razão U/Pb e razões isotópicas de Pb. (A) U *versus* Pb; (B) $^{206}Pb/^{207}Pb$ *versus* U; (C) $^{206}Pb/^{207}Pb$ *versus* Pb; (D) $^{206}Pb/^{207}Pb$ *versus* U/Pb. Legenda: x = pontos não incluídos no cálculo do coeficiente de correlação.

sedimentos, apesar de algumas das amostras terem sido coletadas em áreas de ocorrência de unidades arqueanas (LAS01, LAS02, LAS03 e LAS05, por exemplo).

Até o momento, no setor investigado, tem-se apenas dados isotópicos de Pb em rocha total no granito Itajobi (Borges *et al*., 2002) e de sulfetos (pirrotita) provenientes de xistos e formações ferríferas encaixantes dos alvos Urucum e Taperebá no depósito de ouro da MPBA (Galarza *et al*., 2006). A comparação desses dados com os dados isotópicos de Pb dos sedimentos do rio Amapari (Figura 10) mostra que todos os pontos se posicionam alinhados, e que a faixa de variações de composição isotópica dos sedimentos está contida no intervalo de assinaturas isotópicas dos sulfetos e do granito Itajobi, apontando essas rochas como uma das fontes em potencial para o Pb dos sedimentos. Evidentemente, outras fontes estão envolvidas entre as unidades de rochas supracrustais e granitoides paleoproterozoicos, mas não há dados isotópicos de Pb disponíveis para a comparação com os dos sedimentos.

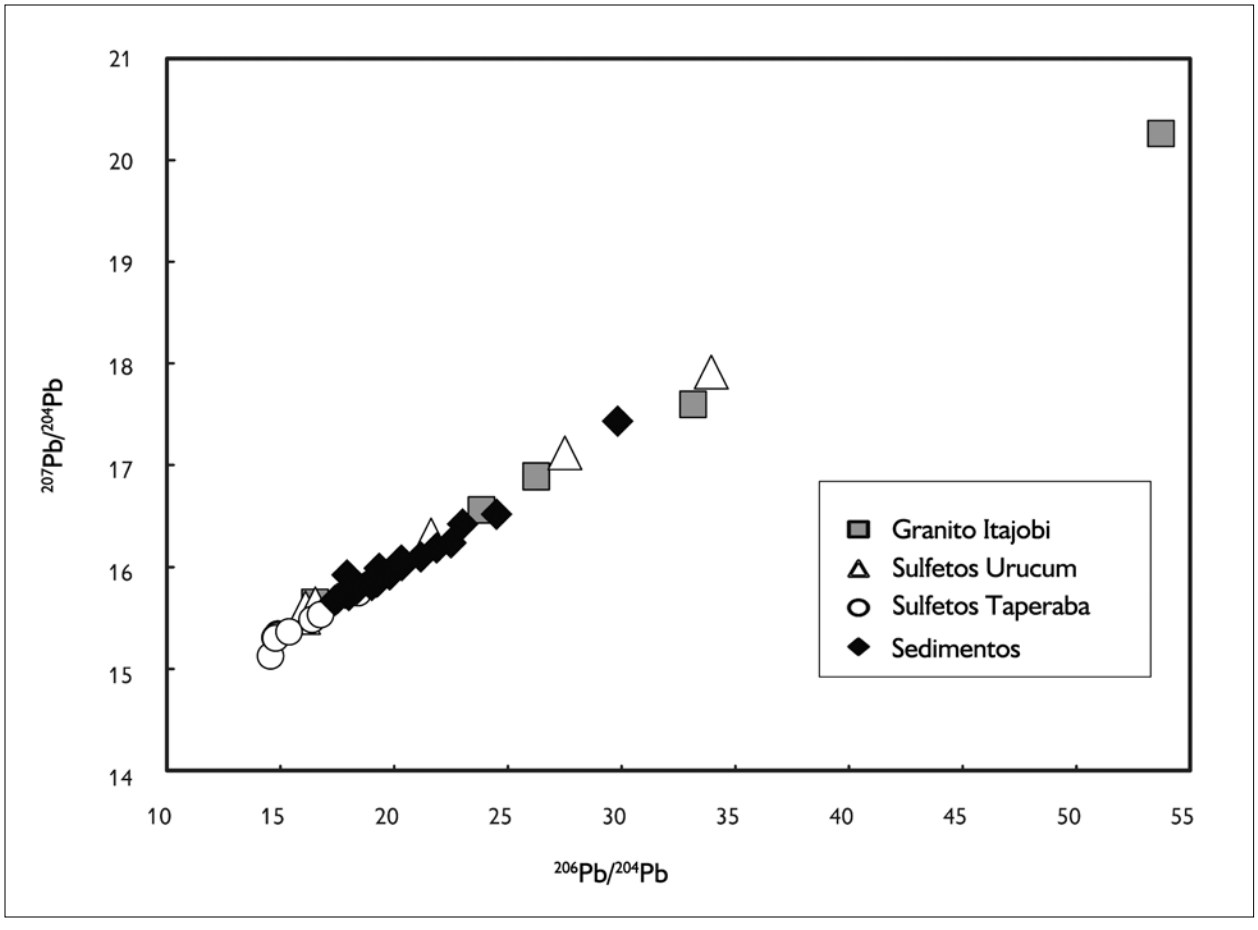

Figura 10. Diagrama $^{207}Pb/^{204}Pb$ *versus* $^{206}Pb/^{204}Pb$ dos sedimentos do rio Amapari e tributários com os resultados obtidos por Borges *et al*. (2002) e Galarza *et al*. (2006). O ponto mais radiogênico do granito Itajobi não foi incluído no diagrama.

Para os sedimentos do rio Cupixi, foi obtida uma idade paleoproterozoica um pouco mais antiga (2,26 Ga), indicando a maior contribuição proveniente de unidades geológicas do início do Riaciano. Novamente, não há evidências isotópicas de contribuição de unidades do embasamento arqueano. Uma maior dispersão de resultados foi encontrada para os sedimentos do rio Cachorrinho, o que pode ser o reflexo de uma participação de rochas-fonte de idades mais variadas, algumas possivelmente arqueanas, provenientes do Complexo Tumucumaque.

Um fato marcante é a boa correlação entre a razão U/Pb e a razão $^{206}Pb/^{207}Pb$, observando-se que as composições isotópicas variam de acordo com a razão U/Pb das amostras. Por exemplo, as amostras do rio Amapari que apresentam as maiores e menores razões U/Pb (LAS18: U/Pb = 0,21; LAS02: U/Pb = 0,38) exibem também as razões menos e mais radiogênicas, respectivamente. Devido ao comportamento geoquímico bastante distinto dos elementos U e Pb em ambientes superficiais, não se esperaria encontrar correlação entre a composição isotópica e a razão U/Pb, como é conhecido em rochas intemperizadas (Roscholt *et al*., 1973). Tal comportamento indica que não houve fracionamento entre U e Pb nos sedimentos (Figura 9) e que, portanto, os minerais que condicionam o comportamento desses elementos não foram destruídos durante o processo de

erosão-transporte-sedimentação e representam ainda a paragênese original das rochas-fonte.

ATIVIDADES DE MINERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS METAIS

Os teores de metais pesados para praticamente todas as amostras ficaram muito acima dos valores de *background* para sedimentos da tabela de valores SQuiRTs da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2008), indicando anomalias de metais pesados, como no caso do Pb, cujos teores estão sempre superiores aos dos *background*, tanto nos sedimentos do rio Amapari quanto em tributários (Tabela 5).

A existência de grandes mineradoras na Serra do Navio, nas proximidades do rio Amapari, no setor estudado, poderia ser apontada com um dos fatores causadores de enriquecimento em metais dos sedimentos, sendo esses elementos produtos ou subprodutos da mineração. Entretanto, a distribuição geográfica dos teores nos sedimentos do rio Amapari e seus tributários sugere que as variações observadas e os altos teores encontrados na maioria das amostras sejam resultado de processos naturais de alteração das unidades geológicas regionais, que são as hospedeiras das principais mineralizações. O fato de os tributários da margem direita do rio Amapari apresentarem teores na mesma ordem de grandeza que os das amostras do leito do rio Amapari também favorece a hipótese de uma origem natural para a concentração elevada de metais.

A comparação dos teores de metais pesados dos sedimentos do rio Amapari e seus tributários, com os valores obtidos no rio William, na área de influência direta das mineradoras de Au e Fe da Serra do Navio (Matta, 2008), mostra que os valores encontrados para Pb, Cr e Zn no presente trabalho estão geralmente muito acima dos valores obtidos no rio William (Tabela 5). No caso do Pb, o teor máximo encontrado nos sedimentos do rio William é de 32,2 mg kg^{-1}, enquanto que todas as amostras de sedimentos do rio Amapari e tributários possuem teores acima de 35 mg kg^{-1}. Portanto, embora os teores dos metais pesados dos sedimentos do rio Amapari e tributários sejam

Tabela 5. Comparação dos teores de metais pesados nas amostras de sedimento do rio Amapari e tributários, com os valores de *background* e das amostras de sedimentos superficiais do rio William (Matta, 2008) expressos em mg kg^{-1}. Legendas: na = não analisado; < ld = menor do que o limite de detecção do método analítico.

Elemento	*Background*[1]	Variação das concentrações de metais na fração fina dos sedimentos				
		Rio Amapari e desembocadura de igarapés desse rio	Rio Cachorrinho	Rio Cupixi	Igarapé Cupixizinho	Rio William[2]
Pb (mg kg^{-1})	4,0-17	38,1-97,7	43,5-82,2	35,7-66,8	38,5-79,2	8,3-32,2
Mn (mg kg^{-1})	400	167- > 10.000	201-2.373	438- > 10.000	534- > 10.000	916-4.209
Ni (mg kg^{-1})	9,9	3,8-200,2	8,5-137,9	23,7-166,7	31,8-237,4	na
Zn (mg kg^{-1})	7,0-38	14-264	28-148	52-165	52-209	0-4,02
Cu (mg kg^{-1})	10,0-25	5,3-226,2	9,1-108,2	11,8-72,1	12,1-160,8	na
As (mg kg^{-1})	1,1	0-1095	0-274	0-498	0-807	< ld
Cr (mg kg^{-1})	7-13	10-197	24-240	82-212	107-230	1,79-8,42
Cd (mg kg^{-1})	0,1-0,3	0,0-2,3	0,3-1,2	0,7-1,4	1,9-2,0	< ld (0,18)
Al (%)	0,26	1,13-10,83	6,47-9,36	5,38-10,30	5,68-9,78	0,06-0,144
Fe (%)	0,99-1,8	0,53-9,23	0,54-9,67	1,27-6,02	1,5-8,81	0,26-0,80

[1] Valores de *background* segundo NOAA (2008).
[2] Valores obtidos por Matta (2008).

muito altos, não há evidência de contribuição significativa causada pelas atividades de mineração. A distribuição dos metais nos sedimentos do rio Amapari e tributários reflete uma concentração natural desses metais a partir da alteração das unidades geológicas enriquecidas em metais, localizadas nas serras e nas partes altas da bacia de drenagem do rio Amapari.

CONCLUSÕES

Os resultados geoquímicos mostraram que os sedimentos possuem altos teores de metais pesados e sofreram os mesmos processos de enriquecimento para os metais investigados. Não foram observadas variações na composição mineralógica, formada por quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita, entre fração fina e fração areia, justificando a similaridade das composições químicas entre essas frações. Em algumas das amostras, foram identificados minerais reliquiares das paragêneses primárias (anatásio, rutilo, microclínio etc.). Os metais pesados apresentam uma correlação melhor com o Fe do que com o Al, corroborando o papel secundário dos argilominerais na concentração desses metais. Apesar de não terem sido detectados minerais de Fe nas amostras, os metais pesados devem estar associados a óxidos-hidróxidos de Fe, na forma de compostos amorfos e/ou mal cristalizados.

A boa correlação entre as razões U/Pb e $^{206}Pb/^{207}Pb$ indica que não houve fracionamento entre U e Pb nos sedimentos e que, portanto, os minerais acessórios que condicionam o comportamento desses elementos não foram destruídos durante os processos de erosão-transporte-sedimentação. As variações da assinatura isotópica de Pb nos sedimentos permitiram construir isócronas no diagrama $^{207}Pb/^{204}Pb$ *versus* $^{206}Pb/^{204}Pb$, que definiram idades em torno de 2,0 Ga, indicando que os sedimentos são provenientes essencialmente das unidades supracrustais paleoproterozoicas (rochas metassedimentares e máficas) e dos granitoides associados. A similaridade das assinaturas isotópicas dos sedimentos com aquelas dos sulfetos das zonas mineralizadas sugere que essas últimas contribuíram significativamente para o enriquecimento em metais dos sedimentos. Apesar de aflorar em extensos locais no percurso do rio Amapari e tributários, o embasamento arqueano não contribuiu significativamente como fonte dos sedimentos.

As concentrações de metais variam de forma bastante significativa, porém aleatória nos diversos pontos de amostragem do rio Amapari. Praticamente todas as amostras analisadas apresentam valores de metais pesados muito acima dos valores de *background* obtidos da NOAA (2008). Entretanto, a distribuição dos teores é muito variada, indicando que não houve homogeneização na escala da bacia de drenagem, e que as concentrações provavelmente refletem as variações de rochas-fonte, naturalmente enriquecidas em metais. Não foi identificada nenhuma correlação entre teores dos elementos e a localização dos pontos em relação às áreas com atividades de mineração. Os fatos de as unidades geológicas portadoras dessas mineralizações localizarem-se preferencialmente nas serras e de a bacia de drenagem do rio Amapari constituir um sistema relativamente fechado favoreceram os processos de concentração natural dos metais nos sedimentos. Os altos teores encontrados em alguns pontos representam um enriquecimento natural de metais devido às mineralizações existentes na região, sem influência significativa das atividades de mineração. A comparação dos teores de metais pesados do rio Amapari e seus tributários com aqueles determinados por outros autores em sedimentos de fundos próximos aos depósitos de Fe e Au da Serra do Navio – Pedra Branca de Amapari confirma essa hipótese.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Geólogo M. C. C. Neto, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Belém, pela colaboração na coleta das amostras, e aos técnicos dos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, pela ajuda na obtenção

dos dados analíticos. D. T. Silva e J. M. Lafon agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de uma bolsa de mestrado e de produtividade em pesquisa, respectivamente. Por fim, agradecemos aos revisores anônimos pela valiosa contribuição para a elaboração da versão final do artigo.

REFERÊNCIAS

ALLÈGRE, C. J., 2008. **Isotope Geology**: 1-512. Cambridge University Press, Cambridge.

AVELAR, V. G., 2002. **Geocronologia Pb-Pb em zircão e Sm-Nd rocha total da porção centro-norte do estado do Amapá-Brasil**: implicações para a evolução geodinâmica do setor oriental do Escudo das Guianas: 1-231. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em <http://www.ppgg.ufpa.br/arquivos/resumos/teses/2002_tese_Valter_Avelar.pdf>. Acesso em: 1 abril 2013.

AVELAR, V. G., J. M. LAFON, C. DELOR, C. GUERROT & D. LAHONDÈRE, 2003. Archean crustal remnants in the easternmost part of the Guyana Shield: Pb-Pb and Sm-Nd geochronological evidence for Mesoarchean versus Neoarchean signatures. **Géologie de la France** (2-4): 83-100.

BARBOUR, A. P., 1966. Nota sobre a lateritização e sua conseqüência no relevo do Território do Amapá. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia** 15(2): 5-31.

BARRETO, C. J. S., J. M. LAFON & L. T. ROSA-COSTA, 2010. Caracterização geoquímica e geocronologia Pb-Pb em zircão do magmatismo riaciano na região central do Amapá, sudeste do Escudo das Guianas. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1-53.

BARRETO, C. J. S., J. M. LAFON, L. T. ROSA-COSTA & E. L. DANTAS, 2013. Paleoproterozoic granitoids from the northern limit of the Archean Amapá block (Brazil), southeastern Guyana Shield: Pb-Pb evaporation in zircons and Sm-Nd geochronology. **Journal of South American Earth Sciences** 45: 97-116.

BENTAHILA, Y., O. HEBRARD, D. BEN OTHMAN, J. M. LUCK, M. SERANNE & M. LOPEZ, 2006. Gulf of Guinea continental slope and Congo (Zaire) deep-sea fan: Sr-Pb isotopic constraints on sediments provenance from ZaiAngo cores. **Marine Geology** 226(3-4): 323-332.

BORGES, A. A. S., J. M. LAFON & R. N. N. VILLAS, 2002. Magmatismo Tardi-Transamazônico na Serra do Navio, região central do Amapá: evidências geocronológicas. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 41: 435.

CARVALHO, J. M. A., M. T. L. FARACO & E. L. KLEIN, 1995. **Carta geoquímico-metalogenética do ouro no Amapá/NW do Pará**: nota explicativa: 1-4: 1 mapa. Escala 1:500.000. CPRM/SGB, Belém.

CHENG, H. & Y. HU, 2010. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review. **Environmental Pollution** 158(5): 1134-1146.

CUNHA, B. C. A., D. ROCHA, M. C. GERALDES, S. D. PEREIRA & A. C. ALMEIDA, 2009. Pb isotopic signatures in sediments of a sub-tropical coastal lagoon: anthropogenic sources for metal contamination in the Sepetiba Bay (SE – Brazil). **Journal of Coastal Research** SI 56: 797-801.

DECKART, K., G. FÉRAUD & H. BERTRAND, 1997. Age of Jurassic continental tholeiites of French Guyana, Surinam and Guinea: implications for the initial opening of the Central Atlantic Ocean. **Earth and Planetary Science Letters** 150(3-4): 205-220.

DELOR, C., E. W. F. ROEVER, J. M. LAFON, D. LAHONDÈRE, P. ROSSI, A. COCHERIE, C. GUERROT & A. POTREL, 2003. The Bakhuis ultrahigh-temperature granulite belt (Suriname): II. Implications for late the Transamazonian crustal stretching in a revised Guiana Shield framework. **Géologie de la France** (2-4): 207-230.

FARACO, M. T. L., P. A. C. MARINHO, E. J. S. COSTA, A. G. VALE & E. CAMOZZATO, 2004. Folha NA.22 – Macapá. In: C. SCHOBBENHAUS, J. H. GONÇALVES, J. O. S. SANTOS, M. B. ABRAM, R. LEÃO NETO, G. M. M. MATOS, R. M. VIDOTTI, M. A. B. RAMOS & J. D. A. JESUS (Eds.): **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas**. CPRM, Brasília. 1 CD-ROM.

FOLK, R. L., 1974. **Petrology of sedimentary rocks**: 1-182. Hemphill Publishing Company, Austin.

GALARZA, M. A. T., J. M. LAFON & M. J. B. MACAMBIRA, 2006. Idades Pb-Pb das mineralizações auríferas dos depósitos Amapari (Amapá), Igarapé Bahia (Carajás) e Mamão (Rio Maria), Amazônia Oriental. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 9: 1 CD-ROM.

GIBBS, A. K. & W. J. OLSZEWSKI, 1982. Zircon U-Pb ages of Guyana greenstone-gneiss terrane. **Precambrian Research** 17(3-4): 199-214.

GIOIA, S. M. C. L., M. M. PIMENTEL, M. TESSLER, E. L. DANTAS, J. E. G. CAMPOS, E. M. GUIMARÃES, M. T. S. MARUOKA & E. L. C. NASCIMENTO, 2006. Sources of anthropogenic lead in sediments from an artificial lake in Brasília – central Brazil. **Science of the Total Environment** 356(1-3): 125-142.

GRUAU, G., H. MARTIN, B. LEVEQUE, R. CAPDEVILLA & A. MAROT, 1985. Rb-Sr and Sm-Nd geochronology of Lower Proterozoic granite-greenstone terrains in French Guyane, South America. **Precambrian Research** 30(1): 63-80.

KOMÁREK, M., V. ETTLER, V. CHRASTNÝ & M. MIHALJEVIČ, 2008. Lead isotopes in environmental sciences: a review. **Environmental International** 34(4): 562-577.

LAFON, J. M., E. RODRIGUES & T. SCHELLER, 1993. Geocronologia Pb-Pb em feldspato e rocha total: procedimento experimental e exemplos de aplicação. **Resumo Expandido do Congresso Brasileiro de Geoquímica** 4: 242-244.

LAFON, J. M., R. P. S. TAVARES, C. C. G. TASSINARI & C. E. M. BARROS, 2008. Idade, caracterização geoquímica e isótopos de Nd dos anfibolitos do Grupo Vila Nova e granitoides associados na Serra do Navio, borda norte do Bloco Arqueano Amapá: implicações geodinâmicas. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 44: 1-59.

LUDWIG, K. R., 2004. **User's manual for ISOPLOT/EX**: a geochronological toolkit for microsoft excel (version 3.1): 1-71. Berkeley Geochronology Center (Special publication, 4), Berkeley.

MATTA, M. A. S., 2008. **Estudos técnicos da qualidade ambiental dos recursos hídricos na região de Serra do Navio e Pedra Branca do Amapari, com vistas a avaliar a situação atual e os riscos de implantação dos projetos de Mineração das empresas MPBA e MMX**: 1-118. Relatório Técnico de Consultoria.

MCREATH, I. & M. T. L. FARACO, 2006. Paleoproterozoic greenstone-granite belts in Northern Brazil and the former Guyana Shield-West African Craton Province. **Geologia USP. Série Científica** 5(2): 49-63.

MELO, L. V., R. N. VILLAS, J. W. SOARES & M. T. L. FARACO, 2003. Geological setting and mineralizing fluids of the Amapari gold deposit, Amapá State, Brazil. **Géologie de la France** (2-4): 243-255.

MONTALVÃO, R. M. G., 1985. Petrologia das Rochas Máfico-ultramáficas do Supergrupo Vila Nova (Greenstone belt) e Grupo Parima (Greenstone belt) e encraves na região do Parima. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 2: 110-123.

MONTALVÃO, R. M. G. & C. C. G. TASSINARI, 1984. Geocronologia Pré-Cambriana do Território Federal do Amapá (Brasil). **Atas do Simpósio de Geologia da Amazônia** 2: 54-57.

MOORE, D. M. & R. C. REYNOLDS JR., 1997. **X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**: 2. ed.: 1-378. Oxford University Press, New York.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 2008. **Screening quick reference tables**. Disponível em: <http://klamathrestoration.gov/sites/klamathrestoration.gov/files/Keep-Me-Informed/RiverRes/NOAA%20SQuiRTS%20Screening%20Reference%20Table.pdf>. Acesso em: 12 julho 2009.

NATRONTEC, 2007. **Estudo de impacto ambiental do Projeto Ferro Amapá**: 1-90. MMX Amapá Mineração Ltda. Natrontec, Rio de Janeiro.

OSKIERSKI, H. C., S. SINDERN, R. F. S. LIMA & R. A. PETTA, 2009. Geogenic and anthropogenic lead isotope signatures in the urban environment of Natal (NE-Brazil). **Environmental Geology** 58(8): 1811-1817.

RABELO, B. V., A. C. PINTO, A. P. S. C. SIMAS, A. T. TARDIN, A. V. FERNANDES, C. B. SOUZA, E. M. P. B. MONTEIRO, F. S. FACUNDES, J. E. S. ÁVILA, J. S. A. SOUZA, L. A. C. GUEDES, O. A. A. PENHA, R. M. S. MELO & V. M. GIBSON, 2008. **Macrodiagnóstico do Estado do Amapá**: primeira aproximação do ZEE: 3. ed.: 1-139. IEPA, Macapá.

RICCI, P. S. F., J. M. A. CARVALHO, L. T. ROSA-COSTA, E. L. KLEIN, M. L. VASQUEZ, A. G. VALE, E. M. B. MACAMBIRA & O. J. B. ARAÚJO, 2001. Geologia e Recursos Minerais do projeto RENCA – Fase I. **Atas do Simpósio de Geologia da Amazônia** 7: 1 CD-ROM.

ROSA-COSTA, L. T., P. S. F. RICCI, J. M. LAFON, M. L. VASQUEZ, J. M. A. CARVALHO, E. L. KLEIN & E. M. B. MACAMBIRA, 2003. Geology and geochronology of Archean and Paleoproterozoic domains of the southeastern Amapá and northwestern Pará, Brazil, southeastern Guiana Shield. **Géologie de la France** (2-4): 101-120.

ROSA-COSTA, L. T., J. M. LAFON & C. DELOR, 2006. Zircon geochronology and Sm-Nd isotopic study: further constraints for the Archean and Paleoproterozoic geodynamical evolution of the southeastern Guiana Shield, north of Amazonian Craton, Brasil. **Gondwana Research** 10: 277-300.

ROSA-COSTA, L. T., J. M. LAFON & C. M. G. SILVA, 2008. Novas evidências de crosta arqueana no sudeste do Escudo das Guianas: delimitação da borda norte do Bloco Amapá. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 44: 64.

ROSCHOLT, J. N., R. E. ZARTMAN & I. T. NKOMO, 1973. Lead isotope systematics and uranium depletion in the Granite Mountains, Wyoming. **Geological Society of America Bulletin** 84(3): 989-1002.

SATO, K. & C. C. G. TASSINARI, 1997. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade-modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In: M. L. COSTA & R. S. ANGÉLICA (Eds.): **Contribuições à Geologia da Amazônia**: 91-142. Sociedade Brasileira de Geociências, Belém.

SCARPELLI, W., A. R. SILVA & C. A. MAROTTA, 1963. Contribuição ao estudo dos protominérios de manganês do distrito de Serra do Navio, Território Federal do Amapá. **Boletim Sociedade Brasileira Geologia, São Paulo** 12: 37-48.

SCHROPP, S. J., F. G. LEWIS, H. L. WINDOM, J. D. RYAN, F. D. CALDER & L. C. BURNEY, 1990. Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element. **Estuaries** 13(3): 227-235.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM), 2004. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo** 1:1.000.000,00 - Folha NA.22-Macapá. Sistema de Informações Geográficas – SIG. 1 CD-ROM.

TASSINARI, C. C. G., J. S. BETTENCOURT, M. C. GERALDES, M. J. B. MACAMBIRA & J. M. LAFON, 2000. The Amazonian Craton. In: U. G. CORDANI, E. J. MILANI, A. THOMAZ-FILHO & D. A. CAMPOS (Eds.): **Tectonic evolution of South America**: 41-95. CPRM, Rio de Janeiro.

TAVARES, R. P. S., 2009. **Granitoides e anfibolitos da Serra do Navio, borda norte do bloco arqueano Amapá**: caracterização petrográfica e geoquímica, geocronologia Pb-Pb em Zircão e isótopos de Nd: 1-114. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: <http://www.ppgg.ufpa.br/arquivos/resumos/dissertacoes/2009_dissertacao_Roberta_Tavares.pdf>. Acesso em: 1 abril 2013.

VANDERHAEGE, O., P. LEDRU, D. THIÉBLEMONT, E. EGAL, A. COCHERIE, M. TEGYEY & J.-P. MILÉSI, 1998. Contrasting mechanism of crustal growth Geodynamic evolution of the Paleoproterozoic granite-greenstone belts of French Guyana. **Precambrian Research** 92(2): 165-193.

WINDOM, H. L., S. J. SCHROPP, F. D. CALDER, J. D. RYAN, R. G. SMITH JR., L. C. BURNEY, F. G. LEWIS & C. H. RAWLINSON, 1989. Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States. **Environmental Science & Technology** 23(3): 314-320.