



INDICADORES GEOQUÍMICOS DO INTEMPERISMO ATUAL NA SERRA DO PIRIÁ, NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ

E.L. de Souza¹; B. Kotschoubey¹; W.N. de Lima¹

¹Centro de Geociências – UFPa, Campus Universitário do Guamá, Av. Augusto Corrêa, s/n, Belém, PA

Recebido em 04/01; aprovado para publicação em 12/01

ABSTRACT

The effects of the present-day weathering in the Serra do Piriá area, NE of the state of Pará, were determined using the chemism of spring waters. At the base of the weathering mantle, quartz remains stable but the other silicates of the metasedimentary substratum undergo hydrolysis, which results in leaching of Si^{4+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ and neoformation of kaolinite. In the saprolitic zone, quartz is fairly stable although it can suffer occasional dissolution during the most rainy periods. In the same conditions, kaolinite likely undergoes discreet hydrolysis, which, however, does not result in individualization of gibbsite. In the lateritic/bauxitic duricrust, quartz is destabilized, kaolinite undergoes incongruent dissolution and gibbsite is formed. At present, monossilicization affects the whole studied area and a discreet allitization can be observed in the duricrust.

RESUMO

Os efeitos do intemperismo atual, no domínio da serra do Piriá, NE do Pará, foram determinados através do quimismo de águas de nascentes. Na base do manto de alteração, o quartzo permanece estável, havendo, porém, hidrólise dos demais silicatos do substrato metassedimentar, lixiviação de Si^{4+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ e neoformação de caulinita. No horizonte saprolítico, embora bastante estável, o quartzo pode sofrer ocasional dissolução durante os períodos mais chuvosos. Nestas mesmas condições, a caulinita sofre, provavelmente, discreta hidrólise, que, no entanto, não resulta em individualização de gibbsita. Na couraça laterítica/bauxítica, o quartzo é desestabilizado, ocorrendo, ainda, dissolução incongruente da caulinita e formação de gibbsita. A área estudada está, portanto, submetida à monossilicização, ocorrendo na couraça uma discreta alitização.

INTRODUÇÃO

Os estudos dos processos envolvidos no intemperismo atual através do quimismo das águas naturais tornaram-se mais expressivos na década de sessenta, destacando-se o trabalho de Tardy (1969) sobre águas percolando diversos maciços cristalinos na Europa e na África. Utilizando diagramas de estabilidade e considerando as taxas de remoção dos cátions básicos em relação à sílica, esse autor determinou os minerais em equilíbrio com as águas bem como os processos geoquímicos atuando nas regiões estudadas. Na caracterização desses processos, o autor adotou a classificação de Pedro (1966), que distingue três principais tipos de intemperismo: alitização, monossilitização e bissialitização.

Na região sudeste do Brasil, entre os primeiros trabalhos abordando a influência de fatores naturais sobre o quimismo das águas subterrâneas podem ser citados os de Moreira-Nordemann & Rebouças (1986), que enfocam a influência da composição dos sedimentos e das águas pluviais sobre as características químicas de águas subterrâneas no vale do Paraíba(SP). Destacam-se, ainda, os trabalhos de Szikszay & Toledo-Groke (1989) e Szikszay *et al.* (1990), que tratam da influência do substrato rochoso sobre o quimismo das águas da zona insaturada, na bacia de São Paulo.

Na Amazônia brasileira, foram, por ora, realizados poucos estudos com objetivo de esclarecer as relações entre o quimismo das águas subterrâneas, as variações sazonais e a natureza das formações geológicas percoladas. Trabalhos pioneiros procurando avaliar a influência da composição das rochas sobre as águas superficiais e subterrâneas foram desenvolvidos no nordeste do estado do Pará, em áreas de ocorrência das rochas sedimentares da Formação Pirabas e do Grupo Barreiras (Sioli, 1951, 1960). Na bacia do rio Amazonas, Sioli (1956) estudou a influência do substrato rochoso sobre o quimismo das águas superficiais, drenando áreas sedimentares de origem marinha e continental bem como áreas onde predominam granitos e gnaisses. Na década de 80, Stallard (1980) e Stallard & Edmond (1983, 1987) também estudaram águas da bacia do rio Amazonas, correlacionando a soma dos cátions com a natureza do substrato. Um trabalho de pesquisa ressaltando a influência do solo sobre a composição das águas de infiltração e de escoamento superficial foi realizado por Leprun *et al.* (1989), no estado de Rondônia.

Surgiu mais recentemente, no norte do Brasil, o interesse pela dinâmica do intemperismo atual e pelos efeitos da ação das águas subterrâneas sobre os produtos minerais constituintes do manto de alteração e do seu substrato. Um estudo enfocando o quimismo das águas que percolam a interface rocha-matriz/cobertura laterítica bem como a litomargem da própria cobertura de alteração, nas proximidades da cidade de Tucuruí, região do Baixo Tocantins, foi desenvolvido por Hieronymus *et al.* (1990). Neste trabalho, foram focalizadas as variações sazonais das condições físico-químicas do meio e do equilíbrio das águas em relação à caulinita, mineral-chave para a determinação do processo intempérico (Tardy, 1969; Thomas, 1994). Avaliando o grau de saturação em relação à gibbsita das águas que percolam os diversos horizontes do perfil intempérico, coletadas em nascentes, os autores mostraram que, independentemente da estação do ano, esse mineral sofre dissolução na crosta laterítica, o que permite a transferência do alumínio para os níveis inferiores do perfil e a sua migração lateral. Na mesma linha de pesquisa, Kotschoubey *et al.* (1990) estudaram águas de nascentes na região da serra dos Carajás, em particular nos domínios das seqüências vulcano-sedimentares dos setores Salobo e Pojuca. Foi evidenciada a desestabilização dos silicatos primários e a neoformação de caulinita e/ou gibbsita, sinais inequívocos de um processo intempérico atual do tipo ferralítico *sensu lato*. Nesse mesmo trabalho, a maioria das águas estudadas revelou uma forte influência de águas pluviais de origem oceânica, apesar da referida região situar-se a uma significativa distância da costa atlântica.

Em trabalho recente sobre a evolução do quadro supergênico no domínio da serra de Trucará, situada próximo de Tucuruí, Hieronymus *et al.* (1999) analisaram em detalhe os processos físicos e químicos que afetam, no presente, a cobertura intempérica daquela área. Observaram que, enquanto em profundidade, a ferralitização estava afetando os basaltos e intercalações pelíticas da Formação Caraipé, em superfície, a espessa couraça laterítica/bauxítica sofria uma lenta degradação. Os autores concluíram que a mobilização do alumínio na cobertura de alteração e a sua migração lateral resultavam em individualização de um horizonte bauxítico na base da couraça e em cimentação de produtos colúviais circunvizinhos por gibbsita.

Com base no quimismo das águas que percolam a cobertura intempérica da serra do

Piriá, pretende-se determinar os fenômenos envolvidos no intemperismo atual e avaliar a influência da composição das rochas do substrato bem como das variações climáticas sazonais sobre as águas consideradas.

A serra do Piriá situa-se no extremo nordeste do estado do Pará, na margem ocidental do rio homônimo, próximo à cidade de Viseu e a cerca de 15 km da orla oceânica (Fig. 1), tendo sido escolhida para o estudo por comportar abundantes nascentes e apresentar feições acidentadas,

facilitando o acesso aos diferentes horizontes da cobertura de alteração.

A área estudada encontra-se na porção norte do Craton São Luís, no domínio do Grupo Aurizona, do Paleoproterozóico (Pastana, 1995; Klein & Moura, 2001). Esta unidade, de caráter metavulcanossedimentar, consiste, essencialmente, em xistos diversos, filitos, metacherts, rochas piroclásticas bem como rochas metamáficas e metultramáficas subordinadas (Klein & Moura, 2001).

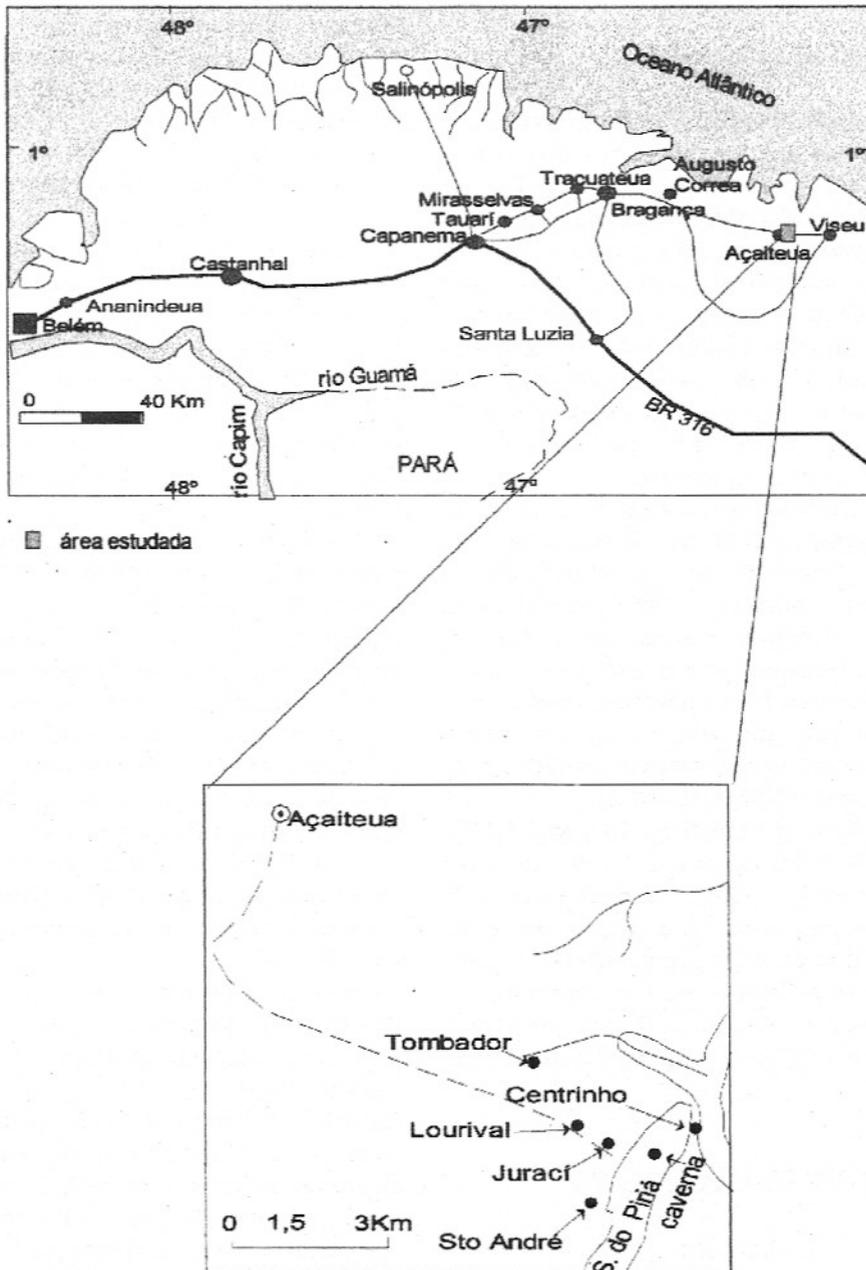


Figura 1 – Localização da área estudada

Relevo dominante na região, a serra apresenta marcante contraste topográfico com as feições planas a suavemente onduladas das áreas circunvizinhas. O seu topo aplainado é sustentado por uma espessa couraça laterítica, enquanto que os demais setores da serra consistem em morros abaulados, comportando apenas latossolos bem desenvolvidos. As águas meteóricas acumulam-se em zonas de maior permeabilidade da cobertura de alteração, formando aquíferos, cuja interceptação pela topografia origina nascentes nos flancos e no sopé da serra.

FISIOGRAFIA

A área estudada, de cerca de 8 km², é pouco habitada, havendo apenas pequenos povoados, cujos moradores vivem de pesca no rio Piriá e de agricultura de subsistência em roçados, sobretudo de cultura da mandioca. Este tipo de cultivo envolve, geralmente, a derrubada e queima da vegetação primária do tipo floresta de terra firme, do complexo botânico da Hiléia Amazônica, que comporta árvores de médio e grande porte (Correa *et al.*, 1974). Na maior parte da área, a floresta foi substituída por uma vegetação de 2^a ou 3^a ordem, a capoeira.

Na região, predomina o clima equatorial de tipo Am de Köppen, caracterizado por uma estação chuvosa, o "inverno", que se estende de dezembro a junho, e por um "verão", nos demais meses, durante o qual as chuvas são menos intensas e menos frequentes, e a taxa de evaporação bastante elevada. A temperatura média anual é de 26°C, a umidade relativa do ar chega a 85% e a precipitação pluviométrica média é de 2.500 mm por ano (DNMET, 1992).

A serra do Piriá possui direção geral NNE/SSW e cerca de 5 km de extensão. A sua parte ocidental é colinosa e exhibe moderados contrastes topográficos, enquanto a sua porção leste consiste, essencialmente, num platô estreito e alongado, com encostas dissecadas e bastante íngremes, que culmina a cerca de 100 m de altitude e possui largura média de aproximadamente 400 m.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Substrato

A área da serra do Piriá é, via de regra, excessivamente pobre em afloramentos de rochas do

substrato, de modo que o quadro litológico em subsuperfície é, por ora, pouco conhecido. Nos setores mais ocidentais da serra, afloram, essencialmente, metacherts. Trata-se de rochas maciças, de grande dureza e notável homogeneidade, exibindo eventuais estruturas coliformes. Na parte leste da serra, afloram, também muito localmente, filitos e xistos alterados, de difícil identificação. Em escavação recente da companhia Cimento Brasileiro S/A (CIBRASA), foi encontrada uma exposição limitada de filito cinza, muito intemperizado, porém com foliação bem preservada. A análise revelou, nesta rocha, a presença de apenas quartzo, caulinita e goethita. A ocorrência de anfibólio-albita-biotita-quartzo-sillimanita xisto na área foi igualmente assinalada por Costa (1982).

Cobertura de alteração

Na serra do Piriá, predominam latossolos amarelos, espessos a medianamente espessos, de textura média a muito argilosa, ácidos a fortemente ácidos, com baixa saturação em bases e pouco férteis (Correa *et al.*, 1974). Latossolos vermelhos ocorrem igualmente, sobretudo nos setores mais ocidentais da serra. Em profundidade, estes solos passam gradativamente para o saprólito.

A meia encosta da serra, aflora um saprólito estruturado areno-argiloso a argilo-arenoso, de coloração amarelada, friável, composto, essencialmente, de quartzo, caulinita e goethita, exibindo, ainda, indícios da foliação da rocha-mãe, provavelmente um filito ou um xisto. Em direção ao topo da serra, o saprólito adquire coloração avermelhada, contém abundantes depósitos cutânicos de hidróxido de ferro, torna-se ainda mais friável e não apresenta mais, macroscopicamente, qualquer estrutura reliquiar. No entanto, vênulas de quartzo preservadas, embora bastante fraturadas, mostram que se trata de um produto *in situ*.

No topo da serra, o perfil de alteração é mais complexo e comporta os seguintes horizontes: 1) a rocha matriz alterada, um filito acinzentado friável, citado anteriormente, 2) um horizonte saprolítico composto sobretudo de caulinita e goethita, com quartzo muito subordinado, exibindo ainda na sua parte inferior a foliação da rocha matriz, 3) um horizonte bauxítico em plaquetas, essencialmente gibbsítico, contendo hidróxido de ferro e caulinita muito subordinados e raros grãos de quartzo e, finalmente, 4) uma possante couraça ferruginosa, de espessu-

ra métrica, maciça a grosseiramente colunar, exibindo uma textura pseudo-pisolítica a brechóide, eventualmente bandada. É constituída essencialmente por hematita e goethita, sendo gibbsita normalmente subordinada e anatásio em quantidades menores. O conteúdo de caulinita é, via de regra, baixo. Não foram encontrados no perfil os fosfatos de Al e Fe citados por Costa (1982,1991). Investigações recentes revelaram, no entanto, que fosfatos ocorrem na área, de modo muito restrito, formando revestimentos de pisos, tetos e paredes de cavernas situadas na interface horizonte saprolítico/cou-raça ferro-aluminosa (Gonçalves & Kotschoubey, 2000). Acredita-se que estes fosfatos tenham sido gerados em condições semelhante às descritas no platô N1 da Serra dos Carajás (PA) por Maurity & Kotschoubey (1995).

METODOLOGIA

Estudo das Rochas e dos Produtos Supergênicos Percolados

Em todos os locais de coleta de águas, foram amostradas a cobertura de alteração e, quando possível, as rochas sãs ou alteradas, aflorando nas proximidades. Algumas amostras de laterita foram coletadas no topo do platô, próximo às cavernas desenvolvidas na couraça ferro-aluminosa que o sustenta. A composição mineralógica desses diferentes produtos foi determinada por difração de raios x, com auxílio de um difratômetro PW 3710 Phillips. Com base na intensidade dos picos dos difratogramas, foi feita uma estimativa dos conteúdos relativos de minerais nas amostras. Foram igualmente efetuadas análises por microscopia ótica das rochas do substrato e dos produtos lateríticos litificados.

Estudo das Águas

A coleta, a preparação e as análises das águas foram efetuadas de acordo com as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1991).

As águas foram coletadas em cinco nascentes situadas a diferentes níveis do perfil de alteração.

As águas das nascentes localizadas em meia encosta da serra (nascentes do Lourival e do Juraci) foram consideradas representativas das so-

luções que percolam o horizonte saprolítico. A água dessas nascentes é utilizada para consumo doméstico pelas dezenas de famílias residentes na área. A nascente Santo André, igualmente situada no domínio do saprolito, é utilizada apenas para lavagem de roupas.

As duas últimas nascentes (do Centrinho e do Tombador) encontram-se em zonas topograficamente mais baixas e as suas águas são representativas da base da zona saprolítica ou do contato do saprolito com a rocha matriz. A nascente do Centrinho localiza-se no sopé oriental da serra, a cerca de 500 metros do rio Piriá, enquanto que a nascente do Tombador situa-se num pequeno vale, na parte ocidental da serra.

As águas foram coletadas na estação seca de 1992 (outubro), nas estações chuvosa e seca de 1993 (abril e outubro, respectivamente), no final do período chuvoso de 1994 (junho) e nas estações chuvosa e seca de 1995 (abril e outubro).

Além das amostragens sistemáticas nos 5 pontos citados, foi também coletada em abril de 93, numa caverna situada na base da couraça, a cerca de 500 m da escavação da empresa CIBRASA, uma amostra de água que tinha percolado o horizonte laterítico. Na mesma ocasião, coletou-se água de chuva. A utilização de apenas uma amostra de chuva limitou, no entanto, a representatividade dos dados obtidos.

A temperatura, o pH e a condutividade elétrica das águas foram medidos *in situ*, enquanto que a alcalinidade foi determinada por titulação ácida, dentro de um prazo de no máximo seis horas após a coleta. Para as análises laboratoriais, as amostras foram filtradas, utilizando-se filtros Sarreiros 0,10 μm , a fim de eliminar, ao máximo, os produtos coloidais.

Os cátions maiores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+) foram analisados por espectrometria de absorção atômica, com auxílio de um espectrômetro FMD4-Zeiss. Cl^- foi determinado por titulação, através do método mercurimétrico. Para SO_4^{2-} , utilizou-se o método turbidimétrico, adicionando-se 20 mg/L de SO_4^{2-} a cada amostra (adição padrão) a fim de melhorar a precisão dos resultados. Os teores de HCO_3^- foram determinados a partir dos valores de alcalinidade. PO_4^{3-} e SiO_2 foram analisados por colorimetria, utilizando-se um espectrofotômetro PM6-Zeiss.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1. O total de cátions(T^+) e/ou ânions(T^-) (em meq/L) mostrou-se, em geral, compatível com os valores de condutividade elétrica próximos do produto $\text{T}^+.90$ ou $\text{T}^-.90$ (Custodio & Llamas,1976).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos Materiais Percolados

No local da nascente Tombador, aflora uma rocha de granulação muito fina, elevada dureza, coloração cinza esverdeada e aspecto homogêneo, embora se observe localmente uma textura fluidal ou uma laminação difusa. Esta rocha é comumente recortada por vênulas de quartzo milimétricas a centimétricas. O estudo por difração de raios x revelou serem quartzo e clorita os minerais principais. Intimamente associados, esses minerais formam uma matriz microcristalina. O quartzo ocorre, ainda, preenchendo pequenas cavidades, nas quais apresenta um padrão em mosaico ou forma microdrusas, enquanto a clorita ocorre em pequenos cristais, não orientados, exibindo, normalmente, uma leve alteração para hidróxido de ferro e argilominerais que constituem diminutos agregados. Sobre a rocha acima descrita e interpretada como clorita-metachert, repousa, em contato brusco, um horizonte saprolítico argiloso e não estruturado que, em direção à superfície, adquire rapidamente características de latossolo. No Centrinho, nenhuma rocha do substrato foi encontrada em superfície. Ali, aflora apenas um latossolo argilo-arenoso, envolvendo, localmente, pequenos blocos de laterita, provenientes do topo da serra.

No local da nascente Lourival e pouco acima deste, afloram, respectivamente, os saprólitos estruturado e não-estruturado, descritos anteriormente. Nesses produtos, a caulinita é o mineral fortemente predominante, sendo, comumente, mal cristalizada. Os grãos de quartzo, abundantes embora subordinados, são fraturados e exibem, comumente, feições corroídas. Os oxidróxidos de Fe consistem em produtos criptocristalinos, distribuídos de modo homogêneo na massa saprolítica argilo-arenosa. O quartzo dos veios é bastante fraturado e mostra sinais de dissolução. O saprólito não-estruturado, quando observado ao microscópio, revela porções reliquias, exibindo a estrutura primária, marcada pela presença de níveis ricos em quartzo, delgados e irregulares, distribuídos em um plasma goethita-hematítico, recortado por cutanes goethíticos. Tais características e, sobretudo, a quase total obliteração das feições originais, sugerem tratar-se de um produto de alteração mais evoluído que o saprólito aflorante na nascente Lourival. Nos arredores das nascentes Juraci e Santo André, o quadro supergênico é muito semelhante ao do setor Lourival, embora as expo-

sições sejam de má qualidade, devido à presença de vegetação mais densa.

Na laterita pseudo-pisólítica que capeia a serra, hematita e gibbsita são os constituintes principais da matriz, enquanto goethita e anatásio ocorrem em menores proporções. Os pseudo-pisólitos são, principalmente, hematita-gibbsíticos ou goethíticos. São freqüentes cavidades revestidas por diminutos agregados de cristais amarelados ou esbranquiçados de gibbsita bem cristalizada, associada à goethita e/ou caulinita mal a bem cristalizadas. Ao microscópio, em luz natural, a matriz aparece como um plasma de coloração cinza amarronzada, quando ferro-aluminoso, até incolor, quando exclusivamente gibbsítico, podendo, ainda, ocorrer zonas opacas, de composição essencialmente hematítica. São freqüentes gretas de contração, fissuras e outros espaços irregulares preenchidos por gibbsita micro- a macrocristalina e, mais raramente, por goethita microcristalina. Alguns pseudo-pisólitos contêm grãos de quartzo angulosos e fraturados, freqüentemente com bordas corroídas.

Águas da Zona de Transição Rocha-Matriz/Base do Saprólito

As águas do Centrinho revelaram valores de pH e de condutividade elétrica em geral mais elevados do que os das águas da nascente Tombador, sendo os valores médios de pH 6,0 e 5,1 e os de condutividade elétrica 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 48 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente (Tabela 1).

Na maioria das amostras coletadas no Tombador, foram encontrados teores de $\text{HCO}_3^- \leq 0,2$ meq/L, condizentes com os baixos valores de pH. No Centrinho, os teores algo mais elevados desse ânion refletem a presença de maior quantidade de cátions básicos (Tabela 1).

Nas águas coletadas na nascente do Centrinho nas três primeiras etapas de amostragem (outubro/1992; abril/1993 e outubro/1993), não foram notadas variações significativas nos teores de cátions e de cloreto (Fig. 2a). Nesses períodos, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} mantiveram-se próximo de 0,5 meq/L, enquanto que a soma dos alcalinos, com predominância de Na^+ , foi $\cong 0,4$ meq/L e similar ao teor de Cl^- . Por outro lado, as amostras coletadas em junho de 94 e em abril de 95, acusaram teores particularmente baixos de cátions, principalmente de Ca^{2+} , com mínimo de 0,02 meq/L, bem como de cloreto e de bicarbonato (Fig. 2a). Nesses dois períodos, o baixo teor de sais detectado nas águas foi, provavelmente, resultado do aumen-

Tabela 1 – Parâmetros físicos e constituintes químicos de águas subterrâneas da serra do Piriá, nordeste do estado do Pará, coletadas em diferentes períodos. Sílica em mmol/L, STD em ppm, demais em meq/L. Condutividade elétrica (C.E.) em $\mu\text{S}/\text{cm}$. nasc: nascente.

a: período seco de 1992 (outubro)

Local de coleta	pH	C.E..	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	STD
Nasc. Juraci	4,7	35,0	0,04	0,07	0,14	0,004	0,02	0,19	0,04	0,09	20,3
Nasc. Lourival	6,4	31,4	0,04	0,08	0,15	0,008	0,05	0,19	0,04	0,14	25,6
Nasc. Santo André	4,7	24,4	0,02	0,06	0,16	0,004	0,01	0,16	0,04	0,08	18,0
Nasc. Centrinho	6,7	110	0,48	0,48	0,36	0,005	0,95	0,32	0,04	0,63	132

b: período chuvoso de 1993 (abril)

Local de coleta	pH	C.E..	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	STD
Nasc. Juraci	5,6	36,2	0,07	0,08	0,15	0,001	<0,01	0,24	0,06	0,09	22,7
Nasc. Lourival	5,5	38,2	0,08	0,08	0,15	0,006	0,05	0,21	0,04	0,06	22,3
Nasc. Santo André	5,4	25,5	0,03	0,06	0,11	0,002	<0,01	0,16	0,05	0,07	16,2
Nasc. Centrinho	6,4	150	0,52	0,57	0,36	0,011	1,16	0,36	0,06	0,64	151
Nasc. Tombador	5,3	52,7	0,06	0,16	0,23	0,012	0,19	0,21	0,05	0,32	49,5
Caverna	5,0	26,3	0,13	0,06	0,05	0,005	0,01	0,15	0,08	0,01	15,0
Chuva	5,5	5,2	0,02	0,01	0,03	0,002	0,01	0,03	0,03	<0,01	4,40

c: final do período seco de 1993 (outubro)

Local de coleta	pH	C.E..	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	STD
Nasc. Juraci	4,4	31,0	0,04	0,06	0,16	0,008	0,10	0,15	0,03	0,09	23,8
Nasc. Lourival	5,8	33,0	0,03	0,07	0,16	0,009	0,06	0,17	0,04	0,16	26,7
Nasc. Santo André	4,4	27,9	0,03	0,05	0,18	0,003	0,14	0,08	0,04	0,08	23,5
Nasc. Centrinho	7,2	115	0,52	0,50	0,34	0,005	0,88	0,35	0,05	0,66	132,5
Nasc. Tombador	5,5	74,6	0,13	0,25	0,28	0,014	0,54	0,12	0,02	0,24	65,0

d: final do período chuvoso de 1994 (junho)

Local de coleta	pH	C.E..	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	STD
Nasc. Juraci	3,5	36,2	0,04	0,05	0,09	0,002	< 0,01	0,15	0,04	0,09	16,2
Nasc. Lourival	4,0	34,4	0,02	0,06	0,10	0,002	< 0,01	0,15	0,04	0,13	18,5
Nasc. Santo André	3,9	26,2	0,02	0,04	0,07	< 0,001	< 0,01	0,09	0,05	0,09	13,5
Nasc. Centrinho	5,4	91,4	0,25	0,28	0,25	0,005	0,50	0,15	0,10	0,31	73,4
Nasc. Tombador	4,6	38,1	0,05	0,13	0,10	0,002	0,17	0,08	0,05	0,21	33,1

e: período chuvoso de 1995 (abril)

Local de coleta	pH	C.E..	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	STD
Nasc. Juraci	5,0	36,0	0,05	0,06	0,11	< 0,001	< 0,01	0,20	0,08	0,10	21,6
Nasc. Lourival	4,6	43,0	0,02	0,07	0,17	< 0,001	< 0,01	0,20	0,03	0,15	22,8
Nasc. Santo André	5,3	16,5	0,01	0,05	0,05	< 0,001	0,01	0,10	< 0,02	0,19	18,0
Nasc. Centrinho	6,3	69,4	0,02	0,21	0,20	0,005	0,34	0,06	0,02	0,46	59,5
Nasc. Tombador	5,6	32,5	0,01	0,12	0,11	0,005	0,10	0,09	0,04	0,29	34,1

f: período seco de 1995 (outubro)

Local de coleta	pH	C.E..	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	STD
Nasc. Juraci	3,8	32,0	0,04	0,06	0,14	< 0,001	< 0,01	0,20	0,04	0,12	21,2
Nasc. Lourival	4,2	32,2	0,08	0,07	0,14	0,005	0,07	0,14	0,06	0,24	32,8
Nasc. Santo André	3,5	26,4	0,03	0,06	0,14	< 0,001	< 0,01	0,17	0,05	0,10	19,2
Nasc. Centrinho	4,0	61,5	0,08	0,17	0,30	0,002	0,18	0,05	0,13	0,40	61,0
Nasc. Tombador	4,3	46,4	0,05	0,20	0,25	0,002	0,21	0,20	0,11	0,37	57,4

to da recarga dos níveis aquíferos, no período que antecedeu a amostragem, e a conseqüente diluição das águas subterrâneas. Entre janeiro e abril de 1992, 1993 e 1995, as precipitações foram 1.577 mm, 1.201 mm e 1.695 mm, respectivamente (Tabela 2), não havendo, portanto, diferenças excessivas entre os três períodos. Entretanto, se forem consideradas apenas as precipitações do mês de abril nesses três anos, nota-se que, em 95, as chuvas foram particularmente abundantes, chegando a aproximadamente o dobro daquelas dos anos de 1992, 1993 e 1994 (Tabela 2). Referente ao ano de 1994, a coleta de águas ocorreu em junho, sendo que, de janeiro até este mês, foram registradas precipitações de 2.095 mm (Tabela 2). Além desse fato, observa-se um sensível aumento das precipitações nos meses de abril e maio, em relação ao mês de março. Portanto, devido a irregularidades no regime pluviométrico, as águas podem, eventualmente, apresentar, no período mais chuvoso do ano, uma diluição atípica. Fato semelhante foi observado em águas de nascentes próximo de Tucuruí, no baixo Tocantins (Hieronymus *et al.* 1990). Nesta área, águas coletadas no final da estação seca, após um curto período de fortes chuvas, revelaram um empobrecimento significativo em sais dissolvidos em relação a águas coletadas no mesmo período do ano, porém antes de terem ocorrido as primeiras precipitações.

Os teores de SO_4^{2-} obtidos, tanto na nascente do Tombador como na do

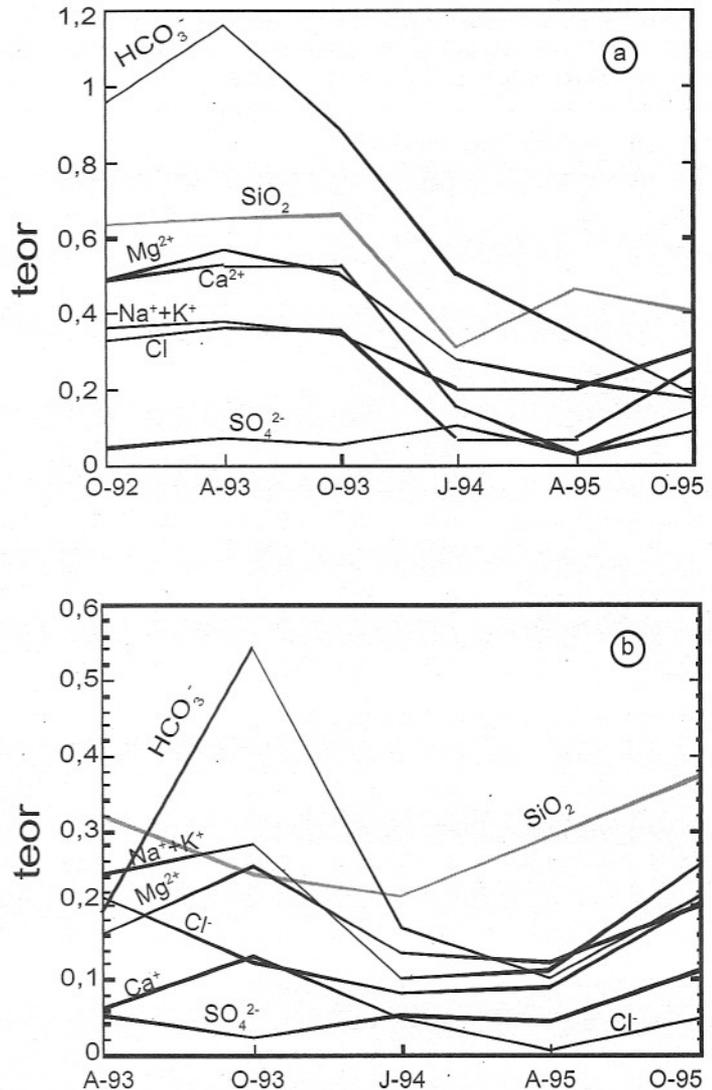


Figura 2: Variação dos teores de sílica (mmol/L) e dos cátions e ânions maiores (meq/L) nos meses de amostragem, em águas percolando a zona de transição rocha matriz/saprólito (serra do Piriá). a) nascente do Centrinho; b) nascente do tombador. A: abril, J: junho; O: outubro.

Tabela 2 – Precipitação pluviométrica(mm) medida na Estação Meteorológica de Tracuateua (PA) nos anos em que foram feitas as coletas. Dados obtidos junto ao DNMET(PA).

Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Total Anual (mm)
1992	354,5	434,6	488,2	299,8	222,8	108,1	150,6	144,0	5,9	0,0	12,6	6,9	2228,0
1993	187,8	406,9	340,4	265,7	302,5	193,9	99,8	149,6	48,2	7,3	26,6	124,8	2153,5
1994	514,1	401,7	246,0	353,7	403,4	176,1	177,4	77,5	27,6	6,0	8,5	96,7	2349,9
1995	262,9	378,1	327,7	725,8	647,2	241,6	183,0	7,6	0,7	0,0	3,4	53,6	2831,6

Centrinho, com média de 0,06 meq/L, não revelaram variações significativas de um período de amostragem a outro (Figs. 2a e 2b). Esse resultado sugere uma origem pluvial para esse ânion.

Em termos gerais, as variações dos teores, tanto dos cátions como dos ânions, nas águas das duas nascentes apresentaram padrões comparáveis (Figs. 2a e 2b).

Os teores de sílica mais elevados foram detectados na nascente do Centrinho (média de 0,52 mmol/L), destacando-se valores particularmente significativos ($\cong 0,66$ mmol/L) nas águas coletadas nas três primeiras etapas de amostragem (Fig. 2a).

Tanto nas águas da nascente do Centrinho como nas da nascente do Tombador, o padrão de variação sazonal do teor de sílica mostra uma relativa similaridade com os apresentados pelos cátions básicos (Figs. 2a e 2b). Essa semelhança sugere que tanto a sílica como Mg^{2+} , Na^+ e Ca^{2+} têm a mesma origem, ou seja, que essas espécies químicas provêm, essencialmente, da hidrólise dos silicatos da rocha matriz, em particular dos minerais ferromagnesianos, mais vulneráveis à ação dos agentes intempéricos, embora os feldspatos, sobretudo os plagioclásios menos estáveis que os álcali-feldspatos, devam também contribuir no processo, fornecendo Na^+ e Ca^{2+} .

O quartzo, embora seja abundante nas rochas metassedimentares siliciclásticas e predominante no metachert, desempenha um papel discreto, se algum, como fonte de sílica. Devido à sua composição (homogênea) e à sua estrutura (compacta), este mineral apresenta uma estabilidade muito elevada em relação à dos demais silicatos primários (Goldich, 1938; Tardy, 1993). Assim, em condições supergênicas, a dissolução do quartzo é, via de regra, um processo muito lento, que libera quantidades geralmente ínfimas de sílica. Esse fato é ilustrado pela ausência de caulinita neoformada na interface de grãos reliquias de quartzo com gibbsita tardia, na base de perfis bauxíticos na Amazônia Oriental (Truckenbrodt *et al.*, 1995).

Para uma melhor avaliação da estabilidade do quartzo, avaliou-se o grau de saturação das águas em apreço em relação a esse mineral, utilizando-se, para tanto, o diagrama de estabilidade $\log[H_4SiO_4]$ versus pH. Esse tratamento, considerando também as águas da zona saprolítica e da base da couraça laterítica, é objeto de item posterior, no qual também se avalia a estabilidade da caulinita face às diferentes águas estudadas.

Águas da Zona Saprolítica

As águas coletadas na zona saprolítica revelaram baixos teores de sólidos totais dissolvidos (STD), predominantemente inferiores a 30 ppm. O pH e a condutividade elétrica também se mostraram baixos, situados em torno de 5,0 e 30 $\mu S/cm$, respectivamente. As variações desses parâmetros foram pouco significativas de uma etapa de amostragem à outra (Tabela 1).

Nas três nascentes estudadas, Cl^- e Na^+ são os íons mais abundantes. O primeiro apresentou teores situados entre 0,08 meq/L e 0,24 meq/L, enquanto que as concentrações de Na^+ variaram de 0,05 meq/L a 0,18 meq/L (Tabela 1). A origem essencialmente pluvial dessas espécies iônicas é sugerida pela relação Cl/Na próxima de 1, valor característico para águas pluviais na região Amazônica (Stallard & Edmond, 1983) e compatível com a localização da área, próxima do litoral.

O cálcio apresentou teores entre 0,01 e 0,08 meq/L, enquanto que as concentrações de magnésio situaram-se entre 0,04 e 0,08 meq/L (Tabela 1).

As baixas concentrações de cátions básicos nas águas em apreço refletem-se nos teores de HCO_3^- , próximos ou inferiores ao limite de detecção do método analítico utilizado (0,01 meq/L) (Tabela 1). Por sua vez, o baixo conteúdo de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ é compatível com a natureza do saprolito, horizonte muito empobrecido nessas espécies químicas. A matéria orgânica, sobretudo na forma de detritos vegetais acumulados nas áreas de recarga dos aquíferos, constitui uma fonte potencial de Ca^{2+} e Mg^{2+} para as águas das nascentes consideradas. Segundo Brinkmann & Santos (1973), nas águas da região amazônica, esses íons provêm, geralmente, da lavagem das plantas pela água da chuva.

Os teores de SO_4^{2-} detectados nas águas da zona saprolítica (predominantemente $< 0,05$ meq/L) não revelaram variações significativas de um período de amostragem a outro (Tabela 1), o que sugere, para esses íons, uma origem pluvial.

Na Figura 3, apresentam-se as concentrações de sílica e das diversas espécies químicas analisadas nas nascentes Juraci, Lourival e Santo André, nas diferentes etapas de amostragem. De acordo com essa figura, constatam-se diferenças marcantes entre os teores de sílica obtidos (mínimo = 0,07 mmol/L; máximo = 0,16 mmol/L), sendo as variações dos teores dessa substância distintas daquelas observadas nas concentrações dos cátions básicos (Fig. 3). Tal fato sugere que

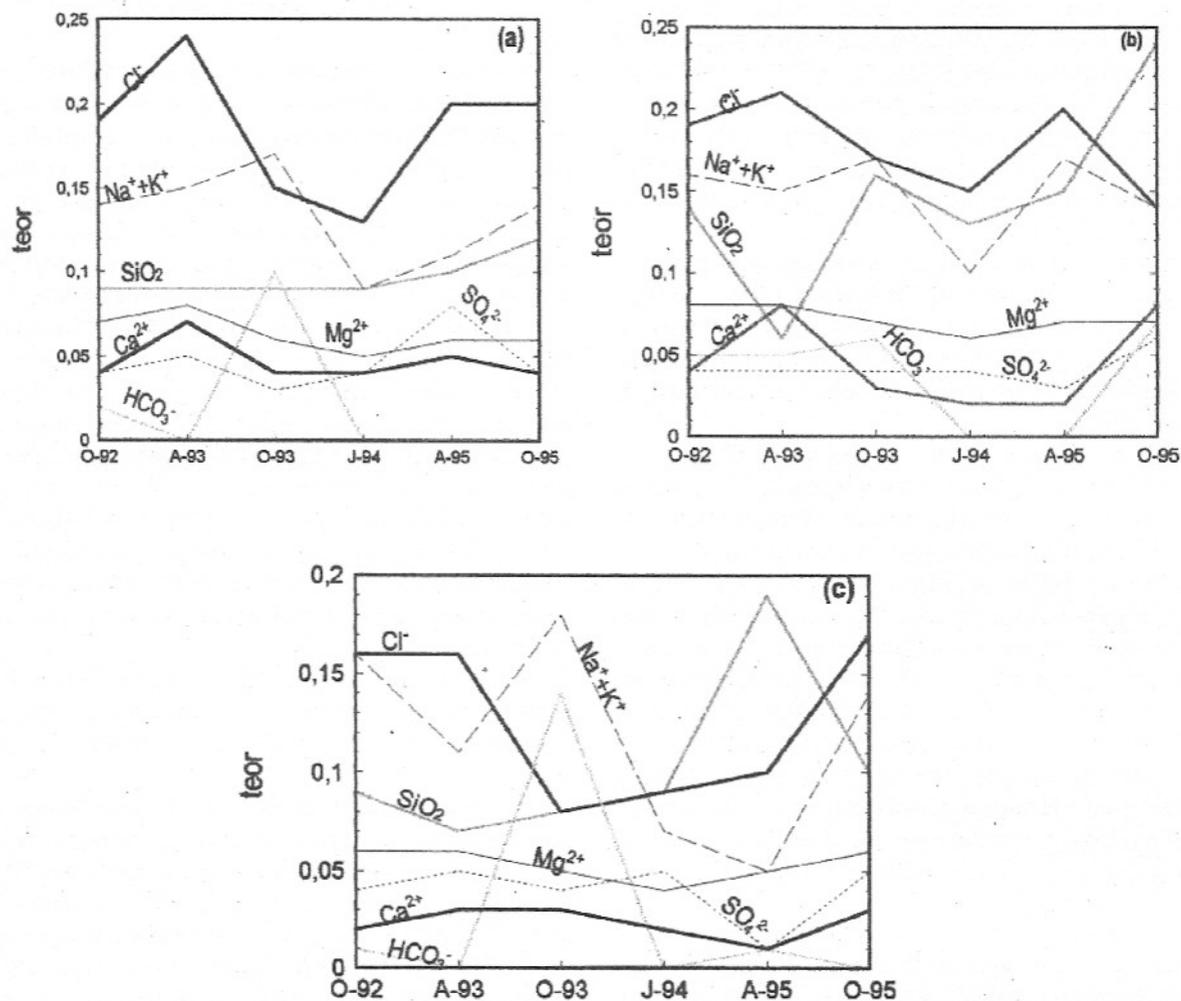


Figura 3 – Variação dos teores de sílica (mmol/L) e dos cátions e ânions maiores (meq/L) nos meses de amostragem, nas águas da zona saprolítica da serra do Piriá.

(a): nascente Juraci; (b): nascente Lourival; (c): nascente Santo André. O: outubro; A: abril; J: junho.

estes últimos e a sílica têm origens diferentes. Considerando que, além de hidróxido de ferro, apenas caulinita e quartzo ocorrem no saprólito, estes minerais são as únicas fontes potenciais de sílica. A estabilidade desses minerais nas diferentes águas estudadas é tratada adiante, em item específico, através de diagramas de equilíbrio.

Água Coletada na Base da Couraça Laterítica

A água de chuva penetra na couraça laterítica através das inúmeras fissuras, fraturas e túbulos. No entanto, tratando-se de um meio extremamente poroso e permeável, o tempo de residência dessa água é geralmente mínimo. As percolações na base da couraça dependem, portanto, do regime pluviométrico. Durante a estação mais seca,

praticamente nenhuma percolação ocorre. A única amostra considerada neste trabalho foi coletada em abril de 93, na parede de uma caverna localizada na interface saprólito – couraça, no setor norte da serra. Os resultados obtidos são, portanto, representativos apenas do período chuvoso daquele ano. Trata-se de água muito pobre em sais (STD = 15,29 ppm), embora se observe um enriquecimento em Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-} em relação à água de chuva (Tabela 1b), que poderia refletir a influência de excrementos de morcegos (guano) e dos seus produtos de alteração, abundantes no local da amostragem (Gonçalves e Kotschoubey, 2000).

O modesto teor de sílica na água expressa a pouca quantidade de silicatos presentes na couraça, sendo a caulinita e o quartzo as fontes potenciais dessa espécie química. A origem da

sílica pode ser melhor avaliada através dos diagramas de estabilidade apresentados no item seguinte.

ESTABILIDADE DO QUARTZO E DA CAULINITA NAS ÁGUAS ESTUDADAS

Com o objetivo de avaliar a estabilidade do quartzo e da caulinita face às águas percolantes nas diferentes zonas do manto de intemperismo, as águas coletadas foram plotadas em diagramas de equilíbrio envolvendo esses minerais.

A estabilidade do quartzo foi avaliada através do diagrama $\log[H_4SiO_4]$ versus pH (Fig. 4), no qual as linhas $\log[H_4SiO_4] = -4$ e $\log[H_4SiO_4] = -2,75$ definem, respectivamente, a solubilidade do quartzo e da sílica amorfa (Drever, 1988).

Na Figura 4, as amostras localizadas mais próximo da linha de equilíbrio com a sílica amorfa e, portanto, mais saturadas em relação ao quartzo, são aquelas coletadas na nascente Centrinho. Nessas águas, é pouco provável uma interação significativa com o quartzo, devido ao elevado grau de saturação em relação a este mineral, tanto em períodos secos quanto chuvosos. Nessa nascente, os teores elevados de sílica são devi-

dos, sobretudo, à hidrólise de silicatos primários, mais alteráveis, das rochas do substrato. Na nascente Tombador, as águas também se mostram supersaturadas em relação ao quartzo, nas diferentes épocas de amostragem (Fig. 4), porém, em geral, de forma menos acentuada do que no Centrinho. Das águas que percolam o saprólito, a maior parte também revela subsaturação em relação ao quartzo, indicando que, nas condições climáticas atuais, essas águas não são normalmente capazes de dissolvê-lo. No entanto, algumas águas do saprólito estão situadas próximo da linha de estabilidade do quartzo, chegando, no caso de uma das amostras da nascente Lourival (abril 1993), a posicionar-se sobre esta linha. Portanto, em épocas de elevada pluviosidade, nas quais o teor de sílica na água apresente-se ligeiramente inferior ao obtido naquele mês, o quartzo poderia, eventualmente, ser atacado.

A água mais subsaturada em relação ao quartzo foi coletada na base da crosta laterítica, no topo da serra. Trata-se, portanto, de uma água capaz de desestabilizar este mineral, cujos poucos grãos exibem abundantes feições de dissolução.

Para avaliar a estabilidade da caulinita na cobertura de alteração, as diferentes águas de percolação foram plotadas no diagrama $\log [Na^+]/$

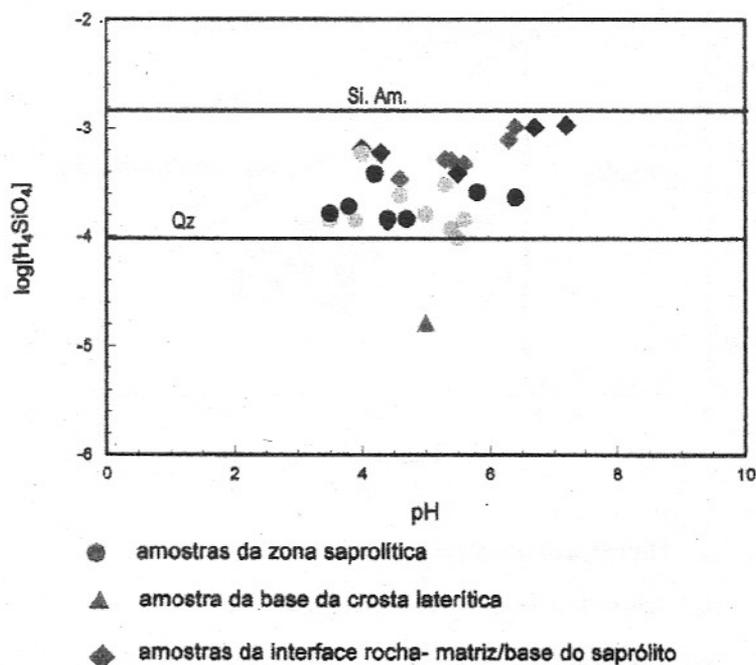


Figura 4 – Diagrama $\log[H_4SiO_4]$ x pH considerando a estabilidade da sílica amorfa e do quartzo nas águas coletadas nos períodos secos e chuvosos, nas nascentes da serra do Piriá. A linha Qz corresponde à solubilidade do quartzo; a linha Si. Am. à solubilidade da sílica amorfa. Símbolos pretos: águas coletadas em períodos secos; símbolos cinzas: águas coletadas em períodos chuvosos.

$[H^+]$ versus $\log [H_4SiO_4]$, envolvendo gibbsita, caulinita, Na-montmorilonita e albita (Fig. 5), cujos campos de estabilidade já foram determinados através de vários trabalhos (Garrels & Christ, 1965). Um diagrama de estabilidade $\log[H_4SiO_4] + \log Al^{3+}$ versus pH, enfocando apenas a caulinita foi igualmente usado (Fig. 6). Este diagrama refere-se a uma caulinita bem cristalizada, com energia livre de formação (ΔG_f°) = -907,68 Kcal/mol, sendo o produto de solubilidade a 28°C definido pela relação:

$$2\log[Al^{3+}]/[H^+]^3 + 2\log[H_4SiO_4] = 7,63,$$

citada por Helgeson (1968). Neste caso, entretanto, foram consideradas apenas duas amostras, coletadas em período seco (outubro de 1992), cujo teor de alumínio foi determinado na Universidade Paris VI.

No diagrama que envolve minerais primários e neoformados (Fig. 5), a maior parte das águas situa-se no campo de estabilidade da caulinita, sem diferenças significativas entre os períodos chuvosos e secos. Este fato aponta a

caulinita como o principal produto de neoformação nos horizontes enfocados, o que é coerente com a abundância desse mineral no manto de alteração. As águas situadas no campo de estabilidade da montmorilonita provêm da nascente Centrinho. Tal posição deve ser considerada com cautela, uma vez que um aumento no valor de $\log [Na^+]/[H^+]$ pode deslocar os pontos para valores de Y mais altos no diagrama. Dessa forma, as águas podem encontrar-se no campo de estabilidade da montmorilonita, mesmo que esse mineral não ocorra nos produtos de alteração. A amostra situada próximo do campo de estabilidade da gibbsita provêm da base da crosta laterítica, em período chuvoso (Fig. 5). Esta posição é compatível com a presença desse mineral em cavidades da laterita intensamente percolada. O baixo conteúdo de sílica e a acidez moderada da água (pH 5,0) sugerem que esta água é igualmente pobre em alumínio e mais agressiva em relação à caulinita que as águas coletadas na zona saprolítica. Assim, ocorreria dissolução incongruente da caulinita que, via de regra, apresenta baixa cristalinida-

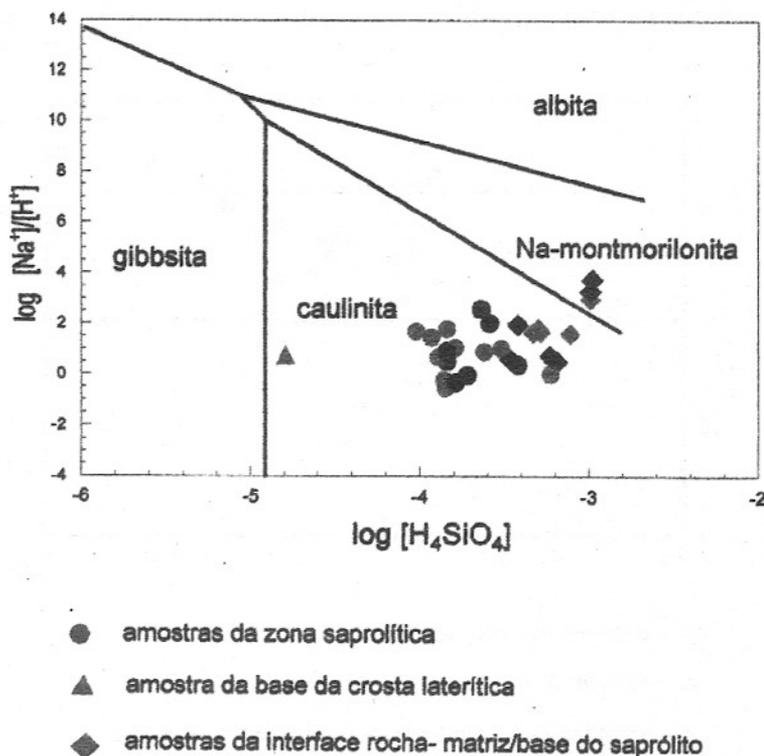


Figura 5: Diagrama de estabilidade da albita, Na-montmorilonita, caulinita e gibbsita a 25°C e 1 atm, em função de $\log [Na^+]/[H^+]$ e $\log [H_4SiO_4]$. Valores de energia livre segundo Robie & Waldbraun, *apud* Tardy (1971). Os pontos na cor cinza correspondem às águas coletadas nos períodos chuvosos enquanto que os pretos se referem àquelas coletadas em épocas secas.

de e, portanto, é mais facilmente desestabilizada (Souza, 1996). Esse fato parece ser comprovado pela presença de pequenos agregados de gibbsita neoformada, em fissuras e cavidades na couraça.

Considerando-se mais especificamente a estabilidade da caulinita, observa-se que as duas amostras estudadas, ambas coletadas durante um período muito seco, são supersaturadas em relação a este mineral (Fig. 6). Tais condições inibiriam, portanto, a degradação da caulinita. Entretanto, na água da zona saprolítica, uma pequena diminuição no valor do pH, do teor de sílica e/ou de alumínio deslocaria o ponto para o campo da subsaturação, tornando possível a dissolução da caulinita. Quanto à água do Centrinho, uma redução no pH também poderia torná-la subsaturada em relação à caulinita (Figura 6). Portanto, é provável que nos períodos de precipitações mais abundantes ocorram condições favoráveis à desestabilização da caulinita mal cristalizada, uma vez que a recarga das águas subterrâneas é particularmente intensa, propiciando uma significativa diluição das substâncias dissolvidas. Cabe ressaltar que nenhum sinal de gibbsita foi detectado na zona saprolítica. Acredita-se que, apesar de possibilitarem uma periódica degradação e hidrólise da cauli-

nita, as condições naturais, no presente, não permitem uma lixiviação eficiente da sílica no horizonte saprolítico. Assim, mesmo nos períodos mais chuvosos, a ocasional dissociação da sílica e da alumina seria seguida de uma imediata ou quase imediata recombinação dessas duas espécies químicas, o que resultaria, apenas, na neoformação de caulinita.

CONCLUSÕES

O quimismo das águas que percolam o manto de intemperismo da serra do Piriá é controlado pela natureza dos produtos de alteração e pelo regime pluviométrico regional.

As águas coletadas em locais topograficamente baixos, na interface substrato/manto intemperado, interagem com os silicatos ricos em elementos alcalinos e alcalino-terrosos das rochas sãs ou dos seus produtos de alteração menos evoluídos. O enriquecimento significativo das águas em SiO_2 (máximo 0,66 mmol/L), Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e principalmente em Mg^{2+} (máximo 0,57 meq/L) mostra que os citados minerais sofrem intensa hidrólise e degradação, que resultam em neoformação de caulinita e hidróxido de ferro. O quartzo, contudo, não sofre dissolução nesse meio.

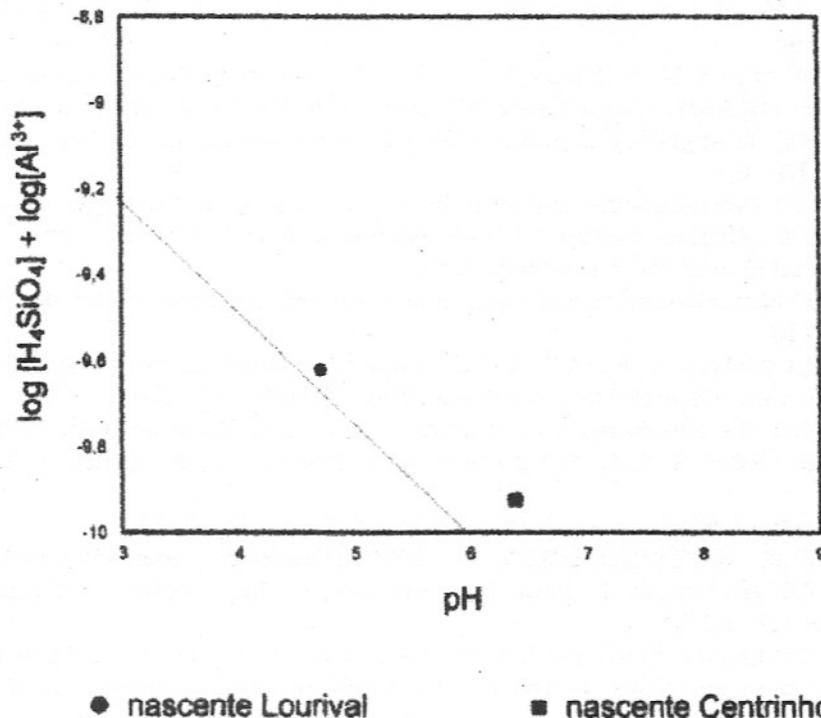


Figura 6 – Diagrama de estabilidade da caulinita em função de $\log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + \log [\text{Al}^{3+}]$ versus pH. A reta corresponde a uma caulinita bem cristalizada ($G_f = -907,68$ Kcal). Amostras coletadas na estação seca de 1992.

No horizonte saprolítico, predominantemente caulínítico, porém com conteúdo significativo de quartzo, as águas revelam uma relativa estabilidade, tanto do quartzo como da caulinita. Entretanto, a lixiviação periódica da sílica e o estudo do quimismo das águas, com base em diagramas de estabilidade, sugerem fortemente que ambos os minerais podem sofrer desestabilização e dissolução durante os períodos mais chuvosos, mais propícios à subsaturação das águas em relação à sílica e à alumina. Contudo, uma vez que a gibbsita não foi encontrada no saprolito, acredita-se que a sílica e a alumina liberadas pela hidrólise recombina-se para gerar caulinita.

Na couraça ferro-aluminosa, por sua vez, observa-se neoformação de gibbsita às custas de caulinita, enquanto que o quartzo sofre dissolução.

Os processos referidos, identificados através do quimismo das águas, indicam que, no presente, a área da serra do Piriá está submetida a um

intemperismo do tipo ferralítico. A monossilicização predomina no perfil de alteração, ocorrendo, na couraça laterítica/bauxítica, uma discreta alitização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP pelo apoio financeiro e aos pesquisadores do Laboratoire de Géochimie et Métallogénie da Universidade Pierre et Marie Curie (Paris VI), França, pelas sugestões. São igualmente gratos ao químico Edivan Costa Oliveira, pelo auxílio nas análises de água, e aos muitos colegas que ajudaram, com críticas e sugestões, na realização do presente trabalho. Finalmente, a primeira autora agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de doutorado, que tornou possível o desenvolvimento de um programa de pesquisa, parte do qual resultou no presente artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRINKMANN, W.L.F. & SANTOS, A. (1973) Natural Waters in Amazônia. VI. Soluble Calcium Properties. *Acta Amazônica*, **3**(2):33-40.
- CARVALHO, I.G. (1995) Fundamentos da Geoquímica dos Processos Exógenos. Bureau Gráfica e Editora Ltda., 239p.
- CORREA, P.R.S.; PERES, R.N.; VIEIRA, L.S. (1974) Levantamento exploratório de solos da folha AS.22 Belém. *In*: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM; FOLHA SA.22 BELÉM: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra. Ed. DNPM., P. III/1-III/160.
- COSTA, M.L. (1982) Petrologisch-geochemische Untersuchungen zur Genese von Bauxite und Phosphat-Laterite der Region "Gurupi" (Ost-Amazonien). Tese de Doutorado. Mineralogisches Institut, Universität Erlangen-Nuremberg, 189p.
- COSTA, M.L. (1991) Mineralogia, geoquímica, gênese e epigênese dos lateritos de Jandiá. *Geochim. Brasil.*, **4**(1):85-110.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. (1976) Hidrologia Subterrânea. Omega SA./Tomo I., 1157p.
- DNMET (1992) Normas Climatológicas (1961-1990). Brasília, 1992. 84p.
- DREVER, J.L. (1988) The geochemistry of natural waters. 2ed. Prentice Hall, 437p.
- GARRELS, R.M. & CHRIST, C.L. (1965) Solutions, Minerals and Equilibria. Harper & Row., 450p.
- GOLDICH, S.S. (1938) A Study in Rock Weathering. *J. Geol.*, **46**:17-58.
- GONÇALVES, D.F. & KOTSCHUBEY, B. (2000) Estudo da cobertura laterito-bauxítica da serra do Piriá - NE do Estado do Pará. *In*: Seminário de Integração Acadêmica da UFPA, 1, Belém. Resumos, CD-ROM.
- HELGESON, H.C. (1968) Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions, I- Thermodynamical relations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**:851-876.
- HIERONYMUS, B.; KOTSCHUBEY, B.; GODOT, J.M.; BOULEGUE, J. (1990) Estudo da interação água-rocha nas formações bauxíticas da Serra de Trucará (Estado do Pará). *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal. SBG., Anais, **3**:867-876

- HIERONYMUS, B.; KOTSCHOUBEY, B.; GODOT, J. M.; BOULÈGUE, J. (1999) Evolução atual da cobertura laterítico-bauxítica da serra de Trucará, baixo rio Tocantins, Pará. *Rev. Bras. Geociências*, **29**(4):649-656.
- KLEIN, E.L. & MOURA, C.A.V. (2001) Age Constraints on Granitoids and Metavolcanic Rocks of the São Luís Craton and Gurupi Belt, Northern Brazil: Implications for Lithostratigraphy and Geological Evolution. *International Geology Review.*, **43**:237-253.
- KOTSCHOUBEY, B.; HIERONYMUS, B.; GODOT, J.M.; SILVA, E.P. da.; BOULEGUE, J. (1990) Geoquímica das águas de percolação em alguns setores da parte nordeste da Serra dos Carajás (Estado do Pará). *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 36, Natal. SBG., Anais, **3**:877-887
- LEPRUN, J.C.; SANTOS, R.D.; CERRI, C.C. (1989) Composição das águas de percolação de solos do Estado de Rondônia. *Geochim. Brasil.*, **3**(1):23-31.
- MAURITY, W.C. & KOTSCHOUBEY, B. (1995) Evolução recente da cobertura de alteração no platô N1 - serra dos Carajás - PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Bol. Mus. Par. E. Goeldi, Série Ciências da Terra*, **7**:331-362.
- MICHARD, G. (1989) *Équilibres Chimiques dans les Eaux Naturelles*. Publisud, 357p.
- MOREIRA-NORDEMANN, L.M. & REBOUÇAS, A.C. (1986) Comportamento geoquímico de íons em águas de chuva. *In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 4, Brasília. Anais, p.221-236.
- PASTANA, J.M.N. (1995) Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. Turiaçu/Pinheiro, folhas AS.23-V-D/AS.23-Y-B. Estados do Pará e Maranhão: Brasília, CPRM/Geological Survey of Brazil, 205p.
- PEDRO, G. (1966) Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération superficielle. *C.R. Acad. Sci., Paris*, **262**:1828-1831.
- SIOLI, H. (1951) Estudo preliminar das relações entre a geologia e a limnologia da Zona Bragantina (Pará). *Bol. Técn. Inst. Agrônômico do Norte*, **24**:67-76.
- SIOLI, H. (1956) O rio Arapiuns. *Bol. Técn. Inst. Agrônômico do Norte*, **17**:1-50.
- SIOLI, H. (1960) Pesquisas Limnológicas na Região da Estrada de Ferro de Bragança, Estado do Pará, Brasil. *Bol. Téc. do Inst. Agrônômico do Norte*, **37**:1-91.
- SOUZA, E.L. (1996) Fatores Controladores do Quimismo de Águas Subterrâneas da Região Nordeste do Estado do Pará. Tese de Doutorado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 189p.
- STALLARD, R.F. (1980) Major Element Geochemistry of the Amazon River System. Ph. D Thesis. M.I.T., Woods Hole, 366p.
- STALLARD, R.F. & EDMOND, J.M. (1983) Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Jour. Geophys. Res.*, **8**(C14):9671-9688.
- STALLARD, R.F. & EDMOND, J.M. (1987) Geochemistry of the Amazon 3. Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. *Jour. Geophys. Res.*, **92**(C8):8293-8302.
- STANDARD METHODS: FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER. (1991) 14 ed. New York, APHA,AWWA,WPCE, 1193p.
- SZIKSZAY, M. & TOLEDO-GROKE, M.C. (1989) Correlation of the chemical composition of water from the unsaturated zone with the mineralogy of a profile on the São Paulo Basin, Brazil. *In: International Symposium on Water/rock Interaction*, 6, Malvern, U.K.. Proceedings, Rotterdam, A.A. Balkema, p.669-672.
- SZIKSZAY, M.; KIMMELMANN, A.A.; HYPOLITO, R.; FIGUEIRA, R.M.; SAMESHIMA, H.R. (1990) Evolution of the chemical composition of water passing through the unsaturated zone to groundwater at an experimental site at the University of São Paulo, Brazil. *Jour. Hidrol.*, **118**(1/4):175-190.
- TARDY, Y. (1969) Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte géol. Alsace Lorraine*, **31**:199p.
- TARDY, Y. (1993) *Petrologie des laterites et des sols tropicaux*. Masson, 495p.
- THOMAS, M.F. (1994) *Geomorphology in the Tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes*. John Wiley & Sons, 460p.
- TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B.; HIERONYMUS, B. (1995) Aluminization: an important process in the evolution of Amazonian bauxites. *Travaux ICSOBA*, **22**:27-42.