



HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS DE DRENAGEM DE UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA NO NORDESTE DA AMAZÔNIA (ESTADO DO AMAPÁ, BRASIL): EFEITOS DA SAZONALIDADE

M.C. Forti¹, A.J. Melfi², P.R.N. Amorim³

¹INPE/NUPEGEL - USP, Caixa Postal 515, São José dos Campos, CEP 12201-970, São Paulo, SP

²ESALQ/NUPEGEL - USP, Caixa Postal 9.638, CEP 01065-970, São Paulo, SP

³ICOMI - Indústrias de Minérios S. A. Caixa Postal 41, CEP 68925-000, Santana, AP

Recebido em 05/97; aprovado para publicação em 02/98

ABSTRACT

The purpose of this research is to carry out a comprehensive study on the seasonality of the water composition of a small catchment (164 ha) in NE Amazonia. The catchment area has an upper part with tropical undisturbed rainforest (34 ha) and the lower part (130 ha) has suffered some anthropic impacts. The results of one year sampling of rainfall, throughfall and stream water is analyzed in the natural and in the altered areas, collected on a weekly basis. The temporal variability of the species concentration are evaluated along with a comparison of the natural forested area waters with the altered one. The analyzed species were: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} . As expected, the input/output relationship of the species in the natural area shows a strong internal recycling component. The water chemistry varies slightly from month to month but that variation leads to a contrasting behavior of the water chemistry between the periods of high and low rainfall. During the wet season, some species, like Nitrate, are lost, but this is not the general trend for the analyzed species. In the altered area, the weathering is intense and almost all products of this process are being lost to the surface waters. The results indicate that this ecosystem can be particularly sensitive to disturbance during the period of high rainfall, due to the high amount of chemical species being exported from the catchment and low nutrient storage capacity.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a sazonalidade da composição química das águas de drenagem de uma microbacia hidrográfica (164 ha), no NE da Região Amazônica. A bacia tem uma área natural de floresta tropical com 34 ha (nascentes); a área restante (130 ha) sofreu alguma interferência antrópica. As amostras foram coletadas entre junho de 1993 e julho de 1994 e analisadas para as seguintes espécies químicas: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} . Foram estudadas as variações temporais das concentrações dessas espécies químicas nas águas, bem como foi efetuada uma comparação da composição química das águas na área natural e na foz, onde a bacia recebe águas das regiões degradadas. A composição dessas águas apresenta uma variação relativa pequena, mês a mês, porém, apresenta um comportamento contrastante entre os períodos de alta e baixa precipitação. Durante o período de alta pluviosidade, algumas espécies, como, por exemplo, o nitrato, são perdidas pelo sistema, porém não é uma tendência geral para as espécies químicas analisadas. Na área impactada, o intemperismo é intensificado e os resultados indicam que o produto desse intemperismo está sendo perdido para as águas de drenagem. Esse ecossistema apresenta alta sensibilidade a impactos ambientais durante os períodos de alta pluviosidade.

INTRODUÇÃO

A relevância de estudos hidroquímicos em florestas tropicais é justificada pela fragilidade desses ecossistemas, não somente quando sob impacto de ações antrópicas, mas, também, em termos da evolução temporal em condições naturais. A despeito da vasta literatura encontrada sobre o assunto, a referência a florestas tropicais implica em grande diversidade de tipos de vegetação e de ambientes. Tratando-se da região Amazônica, a importância desses estudos é amplificada, devido à extensão geográfica e ao papel que essa região florestal exerce no equilíbrio ambiental em escala global. Os estudos mais recentes ampliaram o conhecimento sobre as interações entre a dinâmica da cobertura vegetal com o ambiente, tanto na escala da bacia Amazônica (Pires & Prance, 1984) bem como para algumas regiões específicas (Harriss *et al.*, 1990, Forti & Neal, 1992a, Gash *et al.*, 1996). Em se tratando de áreas sob influência de ações antrópicas, é necessário, em função da variabilidade geológica, pedológica e climática, que sejam conduzidos estudos de longo tempo em escala de microbacia (< 5 km²) que permitam caracterizar o sistema e, assim, buscar soluções para sua preservação, recuperação e/ou aproveitamento econômico.

Em regiões úmidas, como as florestas tropicais, o fluxo e a ciclagem de espécies químicas estão intimamente ligadas ao ciclo hidrológico. Por esta razão, estudos realizados em pequenas bacias hidrográficas, que são uma unidade fisiográfica natural, fornecem respostas satisfatórias, por exemplo, aos processos de lixiviação e ciclagem de nutri-

entes, balanços de massa e efeitos decorrentes da variação do uso e ocupação dos solos. A integração entre hidrologia, química, física e geologia tem assegurado que a avaliação dos processos dentro dessas unidades fisiográficas permaneça como elemento vital para os estudos de bacias hidrográficas, uma vez que as saídas das mesmas fornecem uma integração dos processos que ocorrem em seu interior (Moldan & Cerny, 1994). Assim é que o fluxo de solutos em cursos d'água fornece um resultado bruto das perdas e mecanismos de conservação de nutrientes. A extensão da cobertura vegetal de uma bacia influencia significativamente, por exemplo, a composição química da transprecipitação (chuva que atravessa o dossel); além disso, o estado da zona ribeirinha tem um forte impacto na química dos cursos d'água. Segundo trabalhos recentes na região Central da Amazônia (Lesack & Melack, 1991; Williams *et al.*, 1997), parte do fluxo de espécies químicas em solução parece originar-se da floresta e, aparentemente, representa uma ciclagem relativamente rápida entre a floresta e a atmosfera; os resultados indicam que essa situação pode sofrer uma mudança drástica com o corte extensivo da floresta.

O trabalho, aqui apresentado, foi realizado na região Nordeste da Região Amazônica, em uma área onde uma jazida de manganês vem sendo explorada há cerca de 40 anos. Este estudo é único na região, o que resultou em dificuldades na comparação destes resultados com outros, por exemplo, obtidos na Amazônia Central (Lesack & Melack, 1996) ou em outras regiões tropicais (Lacaux *et al.*, 1992;

MacDowell, 1991). Para sua realização, foi implementado um projeto que permitisse desenvolver estudos hidrogeoquímicos, durante um período de tempo maior do que um período hidrológico completo, e que permitisse avaliar a variação temporal da composição química das águas de drenagem de uma microbacia hidrográfica, que sofreu, parcialmente, o impacto da mineração. O objetivo principal é estudar a influência da alteração da cobertura vegetal nos teores de solutos nessas águas.

Neste artigo, é examinada a variação mensal da composição química das águas da chuva, da transprecipitação e da drenagem, na microbacia, por um período de um ano. Além disso, são efetuadas comparações entre as águas de drenagem da área com floresta natural e da bacia como um todo (com uma componente oriunda da região alterada). A variação mensal nos teores médios das espécies químicas em solução nessas águas permite estabelecer se existe ou não um comportamento sazonal significativo dessas espécies, importante para indicar o estado "nutricional" do sistema como um todo. Embora, quantitativamente, os resultados sejam restritos à região estudada, é possível, através de modelos, utilizar esses resultados para fazer inferências sobre a sazonalidade da resposta hidroquímica de florestas tropicais em ambientes geológicos, pedológicos e climáticos similares.

CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO

A região estudada está situada na porção central do Estado do Amapá, localizada pe-

las coordenadas $00^{\circ} 55' 29,2''$ de latitude Norte e $51^{\circ} 59' 32,6''$ de longitude Oeste (Fig. 1).

A bacia hidrográfica do igarapé Pedra Preta, com 164 ha de área total, é uma sub-bacia do rio Amapari, o segundo maior do Estado, e encontra-se dentro de uma área onde foi explorado, ao longo dos últimos 40 anos, minério de manganês (Fig. 2).

A cobertura vegetal da região estudada é representada pela floresta tropical úmida do tipo terra firme (Pires & Prance, 1984). Trata-se de uma floresta

com vegetação de grande porte com alguns locais de vegetação menos densa, devido à declividade do terreno. Nas áreas onde a vegetação de grande porte é predominante, a vegetação de pequeno porte é praticamente inexistente; nas áreas com menor densidade de vegetação de grande porte é encontrado um extrato intermediário, onde predominam palmeiras; a vegetação rasteira é praticamente inexistente. A porção montante da bacia, com 34 ha de área de drenagem, é recoberta com floresta natural, sem sinal de

alteração; a parte jusante, com 130 ha de área, sofreu forte influência das atividades mineradoras da região. Na área alterada da bacia, parte da vegetação foi removida para a construção de estradas para circulação de veículos da companhia mineradora e para depositar pilhas de material estéril. Uma dessas pilhas deslizou, bloqueando, parcialmente, o igarapé Pedra Preta, formando um lago.

O clima dessa região é tropical, com um regime de precipitação equatorial marítimo,

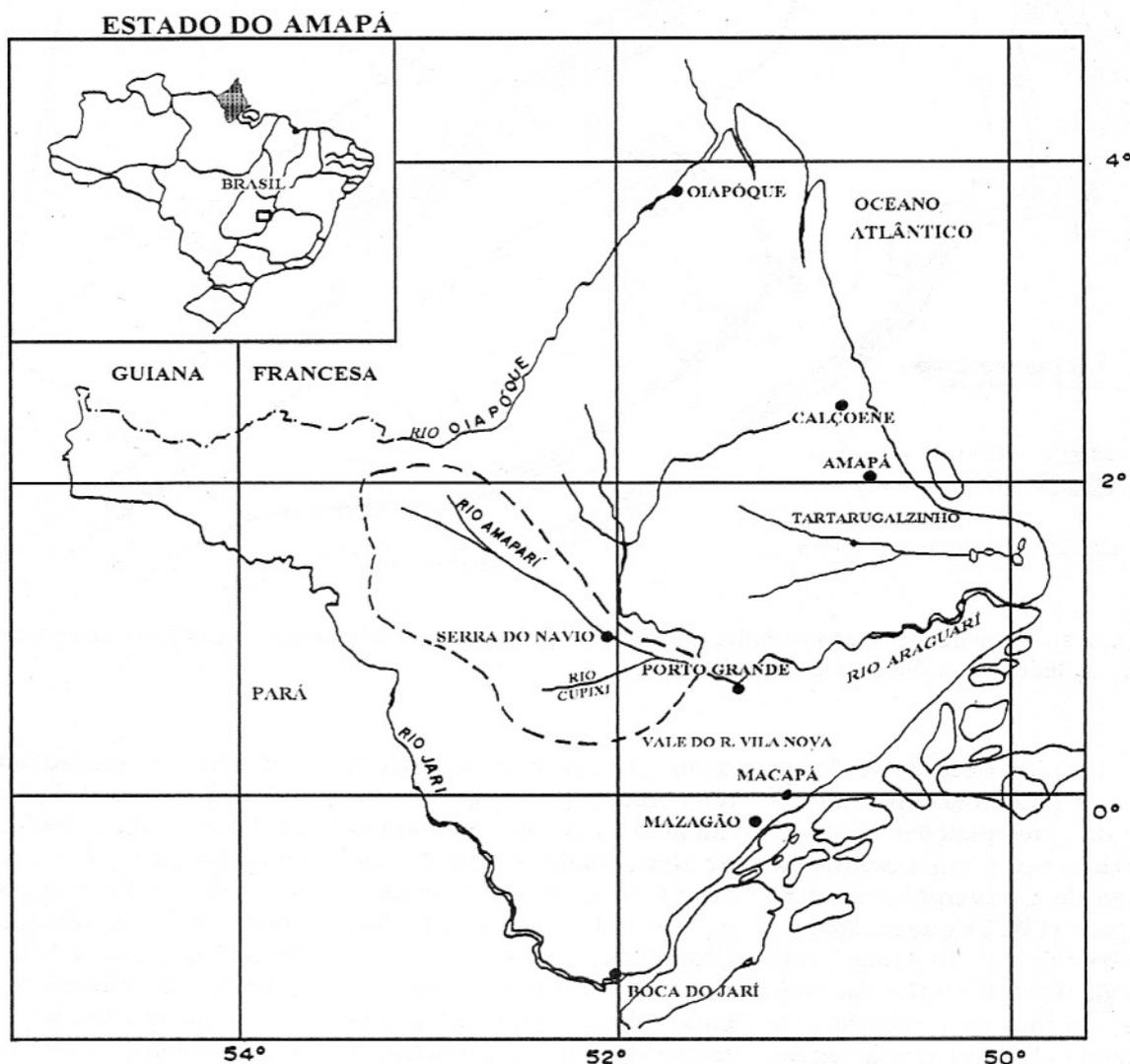


Figura 1- Mapa de localização do Município de Serra do Navio, Estado do Amapá, Brasil.

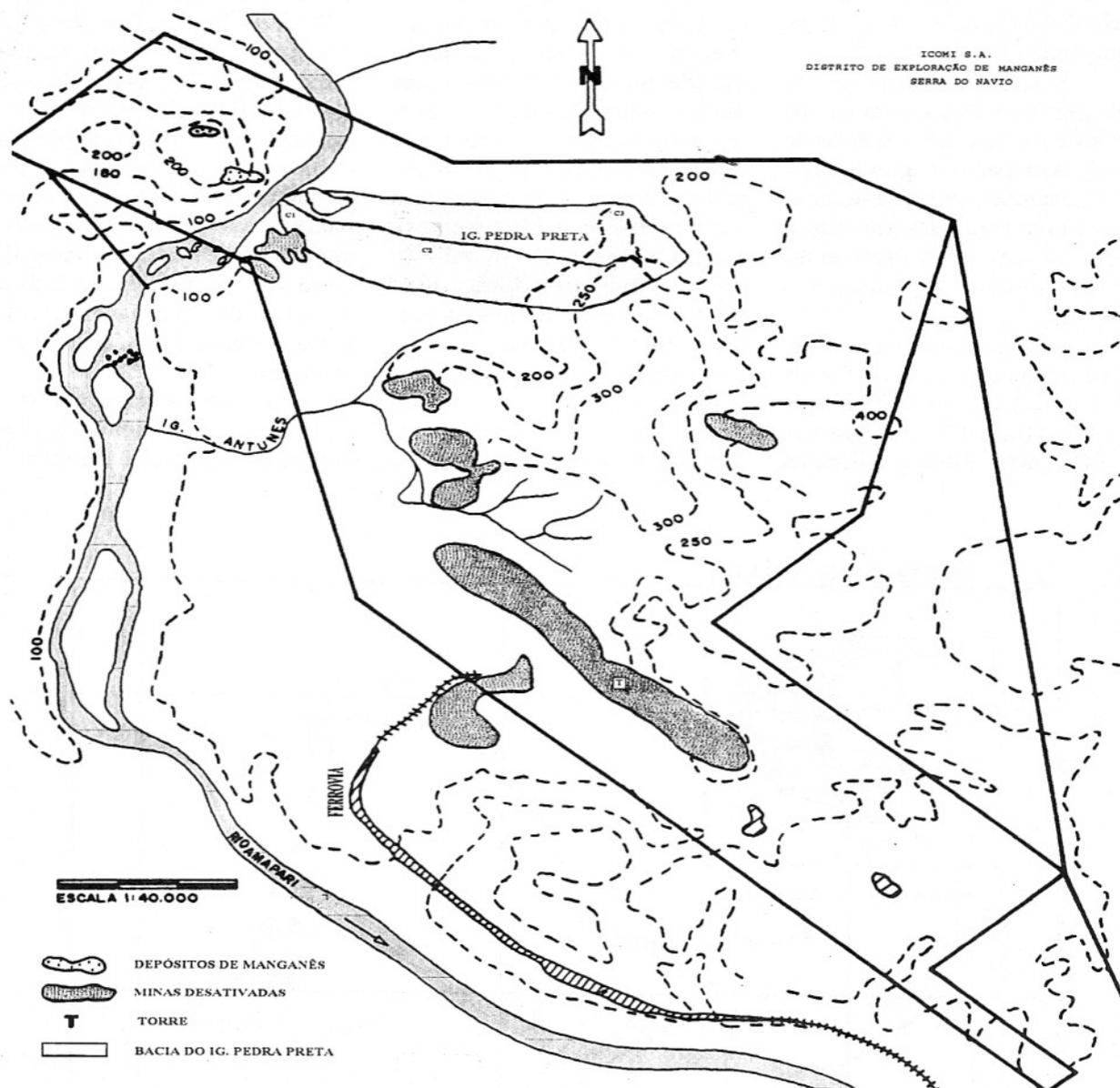


Figura 2 - Mapa de localização relativa da bacia do Igarapé Pedra Preta dentro do polígono de concessão para lavra da Indústria de Minério S/A (ICOMI).

isto é, sujeito à penetração de massas de ar marítimas. O ritmo das precipitações é condicionado pelos movimentos da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), que atinge primeiro o Estado do Amapá, iniciando o período típico das chuvas, no mês de novembro. A estação chuvosa nessa região ocorre, principalmente, entre março e abril e os meses mais

secos são agosto e setembro. A temperatura do ar varia pouco durante o ano, com médias entre 20°C, durante o período chuvoso (inverno), e 30°C, durante o período seco (verão) (Ratisbona, 1976).

Os valores estimados para a precipitação média mensal variou entre 17,2 mm (agosto/1993) e 94,7 mm (maio/1994); o escoamento superfi-

cial médio mensal variou entre 6,8 mm (setembro/1993) e 28,0 mm (junho/1994) na área natural, e entre 13,5 mm (outubro/1993) e 59,0 mm (maio/1994) na foz do igarapé Pedra Preta. Durante o mês de maio/1994, a precipitação foi anormalmente alta, sendo esse mês o mais chuvoso do período estudado (Figs. 3a/b).

A topografia da bacia

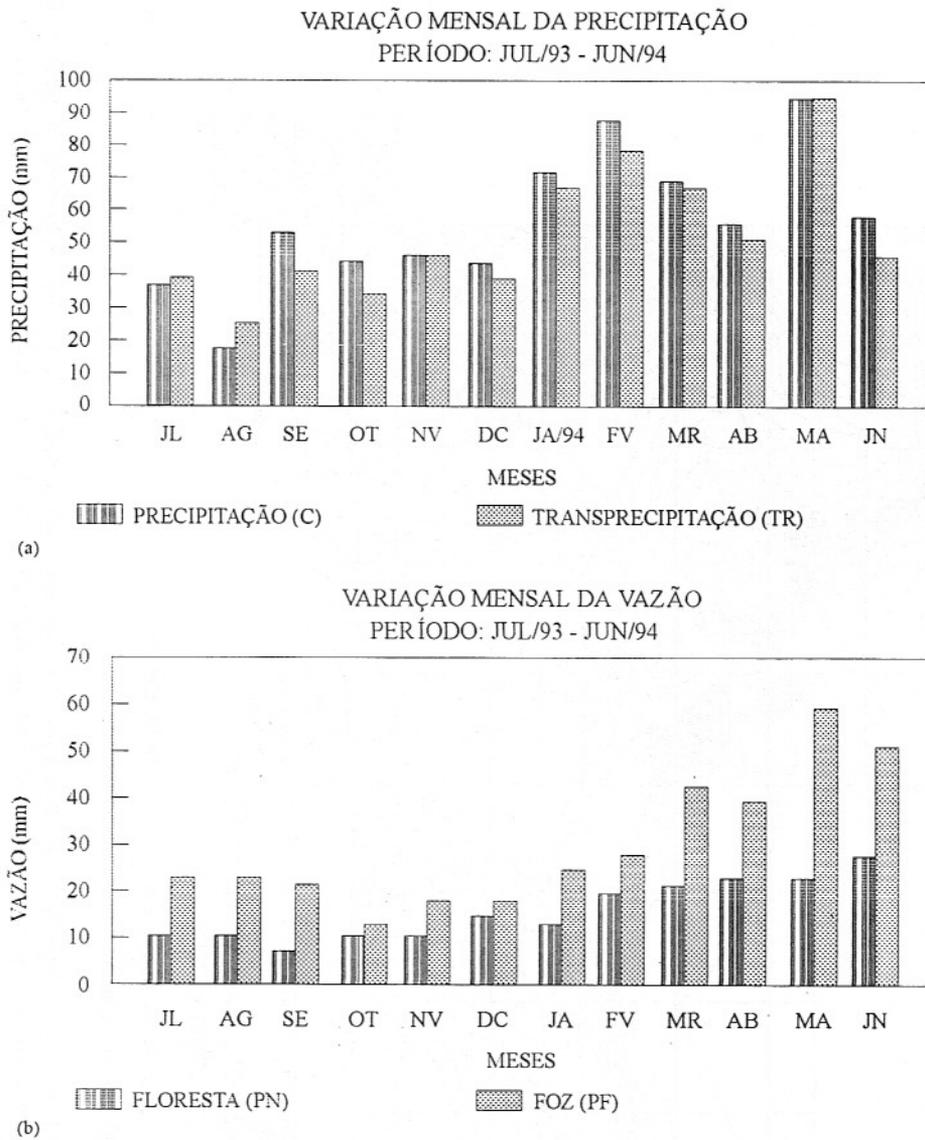


Figura 3 - a) Precipitação (C) e transprecipitação (TR) mensal em mm na área da bacia do Igarapé Pedra Preta. **b)** Escoamento superficial mensal em mm na área natural (PN) e na foz (PF) da bacia do Igarapé Pedra Preta.

apresenta declividade alta, na região das nascentes, e suave, na parte baixa da área de drenagem, variando de 320 m, na parte mais alta, a 100 m, nas áreas de várzea. Embora as curvas de nível estejam traçadas para a bacia como um todo, é preciso ressaltar que, na parte alterada, além da formação do lago e da remoção de parte da vegetação, a topografia, também, foi alterada, modificando o traçado original das curvas de nível (Fig. 4).

A geologia da região da bacia é constituída por um pacote de metassedimentos (quartzo-biotita-granada, xistos e xistos grafitosos) intrudidos por granitos, com textura grossa a pegmatóide. Ao longo dos contatos intrusivos, desenvolveram-se biotita-cummingtonita xisto, como resultado do metamorfismo térmico. Ao longo das falhas, normalmente, desenvolvem-se xistos ferruginosos de coloração vermelha a

marrom. Rochas para-anfibolíticas ocorrem na porção nordeste da área (Soares & Lima, 1994). Os solos podem ser classificados, genericamente, como latossolos amarelo-avermelhado distróficos (oxissolos). Na maior parte da área da bacia, os solos apresentam um horizonte nodular com espessura de cerca de 1 m e que afloram a menos de 20 cm de profundidade. Os nódulos e blocos, de até 50 cm de diâmetro, são for-

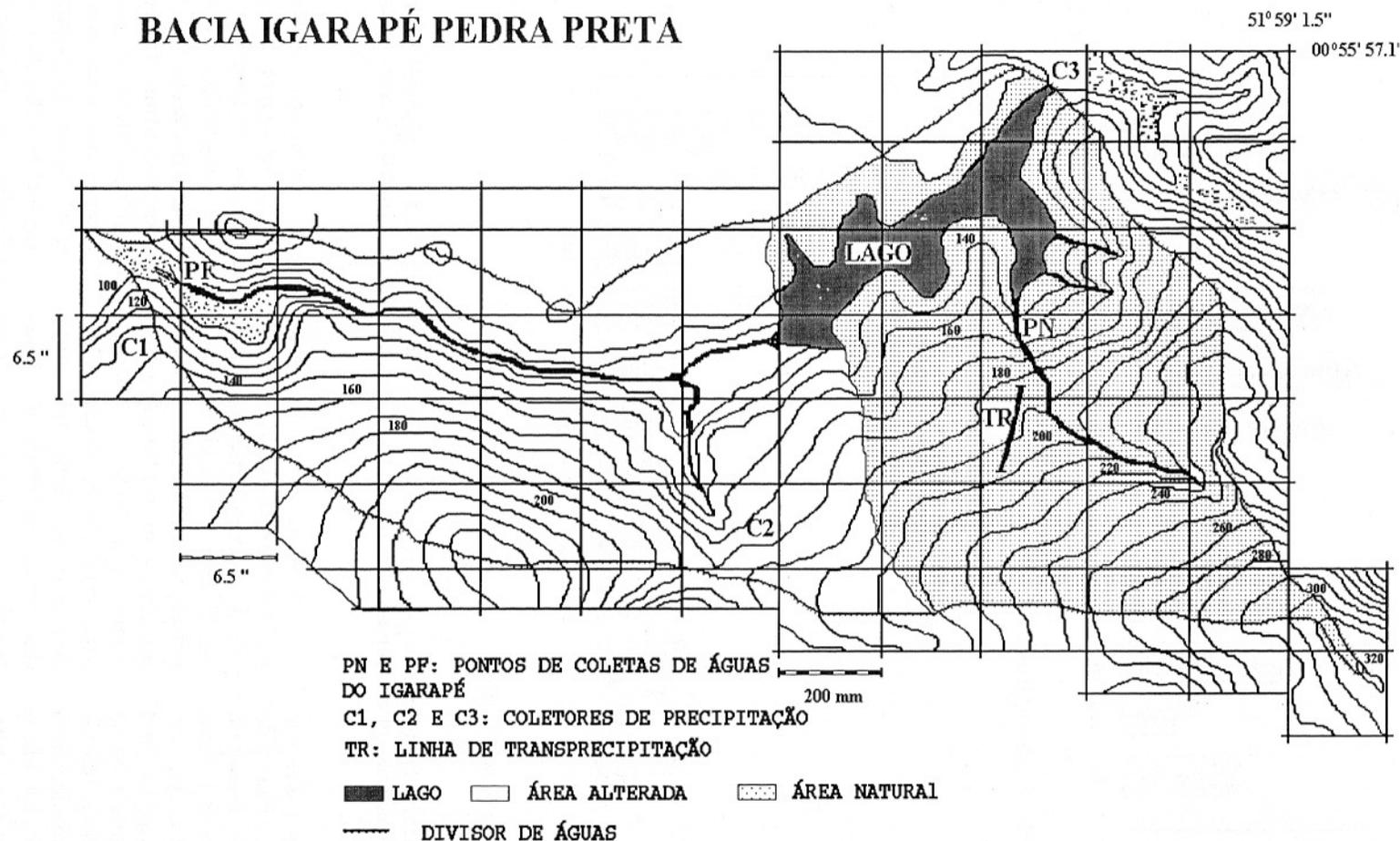


Figura 4 - Mapa mostrando a topografia original da bacia do Igarapé Pedra Preta e a localização dos coletores. C1, C2 e C3 coletores de chuva (C); TR linha de coletores de transprecipitação; PN local de coleta de amostras do igarapé na área natural e PF local das coletas de águas do igarapé na foz.

mados por oxi-hidróxidos de manganês e ferro. Os blocos representam restos de uma cou-raça, parcialmente fragmenta-da, que permanece no topo do interflúvio.

METODOLOGIA

Durante o período de ju-lho de 1993 até junho de 1994, foram coletadas amostras de água de chuva, de transpre-cipitação e do igarapé (em dois locais), com freqüência sema-nal. Para as coletas de precipi-tação, foram instalados três co-letores (funil de polietileno com 167,4 cm² de diâmetro acoplado a uma garrafa de polietileno), C1, C2 e C3, em áreas de cla-reiras e cuja localização relati-va está na Figura 4. Os coletor-es de transprecipi-tação (idên-ticos aos anteriores), em núme-ro de 20, foram instalados em posição fixa sobre uma linha, aproximadamente, perpendicu-lar ao curso d'água e separados por uma distância de 5 m (Forti & Neal, 1992b). As amostras de água do igarapé foram coletadas na saída da área de drenagem da floresta (área natural - PN) e na saída da área de drenagem da bacia, na foz (área com in-fluência da mineração - PF) (Fig. 4). A largura e a profundi-dade média, medidas no mo-mento de cada coleta, foram de 90 cm (largura) e 12 cm (pro-fundidade) na área natural e 110 cm (largura) e 22 cm (profun-didade) na foz do igarapé Pe-dra Preta. Em função dessas di-mensões, as coletas foram fei-tas, mergulhando-se completa-mente a garrafa de coleta (ca-pacidade de 2 l) no meio do cur-so d'água, tanto na parte natu-ral, como na foz. Devido à im-possibilidade de instalar um limnógrafo, a vazão do momen-to da coleta foi estimada a par-

tir das medidas da seção trans-versal do igarapé (nos dois pon-tos de coletas), e da velocidade das águas (medida num inter-valo de distância de aproxima-damente 5 m). Os valores obti-dos são uma estimativa do vo-lume de base exportado da bac-ia, durante o período de tem-po aqui considerado.

A precipitação foi estima-da a partir das medidas dos volumes amostrados em cada coletor, sendo, esse valor, utili-zado para o cálculo da precipi-tação do período de amos-tragem. A partir das três amos-tras de chuva (coletadas simul-taneamente), foi composta uma única amostra, retirando-se alíquotas proporcionais ao vo-lume precipitado em cada coletor. A amostra de transpre-cipitação foi composta da mes-ma forma que a de precipitação, utilizando-se alíquotas de todos os coletores. Logo após a cole-ta, e para todas as amostras, fo-ram efetuadas as medidas de pH e alcalinidade; as amostras fo-ram filtradas em filtros de membrana Millipore (0,22 µm de diâmetro de poro), preserva-das e mantidas sob refrigeração a 4°C, até o momento da análi-se. As alíquotas destinadas às análises dos metais foram pre-servadas com ácido nítrico suprapuro na proporção de 1% em volume. Para as análises dos ânions, não foi acrescentado preservante e as amostras foram armazenadas em frascos de polietileno de alta densidade. Como as amostras foram filtra-das em 0,22 µm, isso garantiu a eliminação de microorga-nismos (as bactérias são maio-res do que 0,22 µm).

Tanto os cátions (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ e NH₄⁺) como os ânions (Cl⁻, NO₃⁻ e SO₄²⁻) fo-ram analisados por cromato-grafia líquida de íons. Foi utili-zado um equipamento DIONEX

DX-500 e colunas CS12 para as análises dos cátions, tendo, como eluente, uma solução de ácido metanosulfônico; para os ânions, utilizou-se uma coluna AS4A, e, como eluente, uma solução de carbonato/bicarbonato de sódio (Weiss, 1986). A precisão dessas análises foi in-ferior a 10% e a acuracidade das mesmas foi testada comparan-do-se padrões utilizados pelo laboratório de hidroquímica do Institute of Hydrology (U.K.), cujos resultados são mostrados na Tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discus-sões são apresentados tendo como base os valores das mé-dias ponderadas mensais dos teores das espécies químicas para cada compartimento estu-dado. A análise da variação saz-onal da composição química das diferentes soluções aquosas foi elaborada a partir da avalia-ção da porcentagem de cada cátion em relação à soma total dos cátions e de cada ânion em relação à soma total dos ânions. Esse tipo de análise permite verificar se existe diferença sig-nificativa no equilíbrio eletro-químico da solução estudada, para o período considerado. Para essa mesma microbacia, foram avaliadas, através do cál-culo do inventário das quanti-dades de massa em kg/ha para cada compartimento, as razões entre as entradas e saídas. Esse inventário permite determinar as perdas ou retenção das espé-cies químicas para cada mês do ano estudado, e, assim, verifi-car se existe um comportamen-to sazonal. As comparações entre as entradas e saídas são feitas para a área natural (PN) e para a bacia como um todo

Tabela 1 - Resultados comparativos das análises dos íons maiores por cromatografia líquida de íons (DIONEX DX500) entre os padrões utilizados pelo Institute of Hydrology (IH-UK) e os padrões utilizados neste trabalho, em $\mu\text{mol/l}$.

$\mu\text{mol/l}$	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	NH_4^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
IH-UK	8,7 \pm 0,6	5,1 \pm 0,3	8,2 \pm 0,5	10,0 \pm 0,6	11,1 \pm 0,8	2,8 \pm 0,3	7,9 \pm 0,8	10,4 \pm 0,7
NUPEGEL	9,6	5,4	8,4	10,9	11,4	2,7	7,9	10,1

(PF), sendo que, nesta última, existe um componente oriundo da área degradada, incluindo-se, aí, o lago.

Os percentuais das cargas

Na Figura 5(a/h), é apresentada a contribuição percentual relativa de cada espécie para as cargas totais de cátions e ânions nas diferentes soluções amostradas.

Esses resultados foram calculados para a precipitação (C), a transprecipitação (TR) e para as águas do igarapé Pedra Preta, na saída da área natural (PN) e na saída da bacia (PF). O balanço de cargas, para os íons medidos, nas águas da precipitação (C), transprecipitação (TR) e do igarapé na área natural (PN) e na foz (PF) apresenta uma eletroneutralidade (Appelo & Postma, 1994) média de 55%, 45%, 27% e 3%, respectivamente. Pode-se considerar que as águas em PF apresentam equilíbrio eletroquímico, sendo, os íons medidos, os mais importantes. Entretanto, para as outras soluções, principalmente nas precipitações, existe uma deficiência em ânions. Como os ânions orgânicos não foram dosados, e sabendo-se que ânions dos ácidos orgânicos como o fórmico e o acético têm presença importante nessas águas (Andreae *et al.*, 1988; Williams *et al.*, 1997), pode-se associar os altos valores da eletroneutralidade à presença desses

ânions. Nas águas de chuva, o valor médio da diferença entre cátions e ânions é 0,11 mmol/l, valor, este, inferior aos medidos na região de Manaus (0,86 mmol/l, Benedetti & Cornu, dados não publicados, Eyrolle *et al.*, 1996). Medidas efetuadas nas águas do rio Amapari, próximas à foz do igarapé Pedra Preta, forneceram valores de concentração de 3,0 mgC/l (Benedetti & Cornu, dados não publicados); medidas realizadas no igarapé Pedra Preta forneceram valores entre 2,5 e 5,5 mgC/l (Fostier, dados não publicados). A deficiência média em ânions, para o período estudado, nas águas do igarapé na floresta (PN) é de 176 $\mu\text{Eq/l}$, o que corresponde a 2,1 mgC/l; esse valor é compatível com a diferença encontrada. Com base nesses valores, é possível admitir que, de fato, essas águas estão em equilíbrio eletroquímico e que a diferença corresponde aos ânions orgânicos.

Através das variações mostradas na Figura 5(a/h), é possível observar o comportamento relativo (em % relativa das cargas) entre as espécies químicas dosadas. O sódio não apresenta variação acentuada ao longo do ano, mostrando um decréscimo no período de transição entre a estação seca e a chuvosa, isto é, entre os meses de novembro e janeiro. Esse decréscimo é mais acentuado nas águas de chuva (C), sendo, aproximadamente, constante

nas do igarapé na floresta (PN).

O potássio representa entre 2% e 6% das cargas catiônicas na precipitação, subindo para até 27%, na transprecipitação. No igarapé, em PN, o percentual se mantém equivalente ao da precipitação. Entretanto, na saída da bacia, em PF, o percentual aumenta, devido à influência da área alterada. Na transprecipitação (TR), os percentuais de K^+ são mais elevados, devido à lixiviação da vegetação, observando-se uma diminuição desses percentuais durante os meses mais chuvosos. Esse decréscimo acompanha o aumento dos percentuais de outros cátions. Entretanto, não são observadas variações significativas ao longo do ano.

O magnésio representa entre 15% e 30% das cargas positivas, tanto em PN, como em PF. O percentual na precipitação é da ordem de 50% inferior ao das águas do igarapé. Este fato evidencia que o sistema apresenta uma perda significativa dessa espécie ao longo do ano: contribuições da precipitação e da transprecipitação não são suficientes para equilibrar com os valores observados nas águas do igarapé. As concentrações de magnésio na precipitação estão dentro do intervalo de variância da média, não apresentando qualquer evidência de variação sazonal; o mesmo ocorre na transprecipitação. Nas águas do igarapé, tanto em PN como em PF, as variações

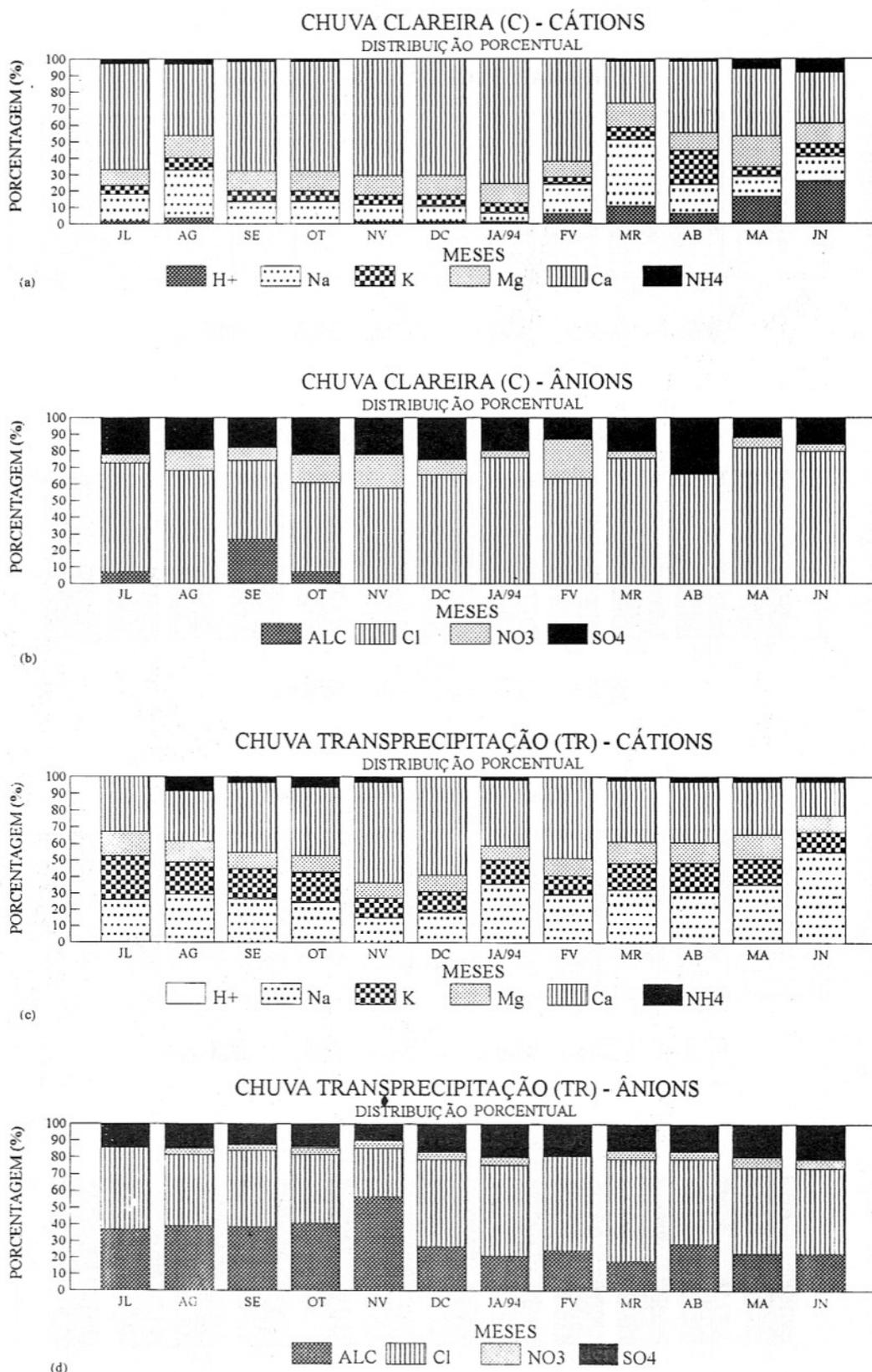


Figura 5 - Variação mensal da porcentagem de cátions e ânions nas águas da precipitação (C), da transprecipitação (TR), do igarapé área natural (PN) e na foz (PF). (a) cátions - C; (b) ânions - C; (c) cátions - TR; (d) ânions - TR; (e) cátions - PN; (f) ânions - PN; (g) cátions - PF e (h) ânions - PF.

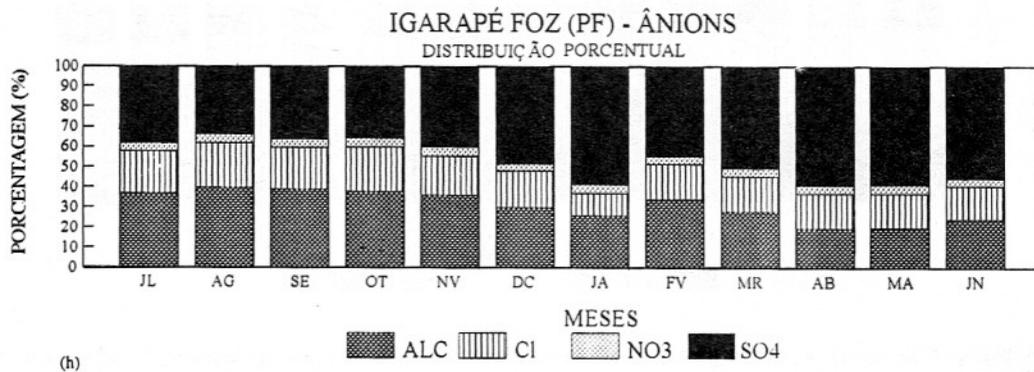
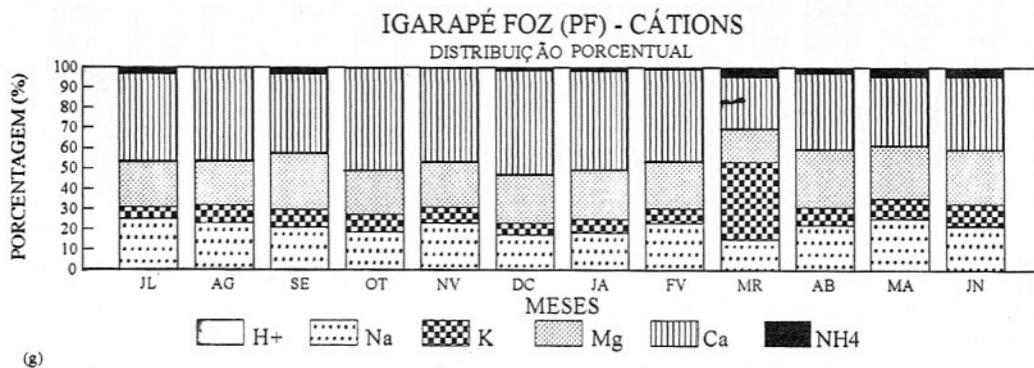
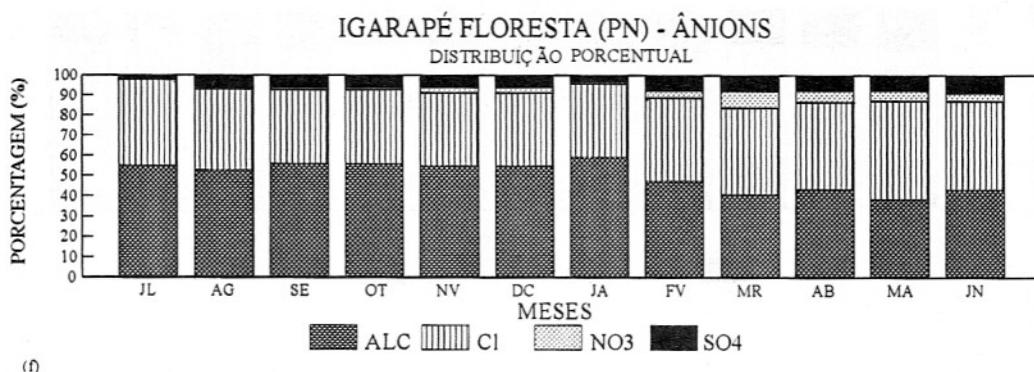
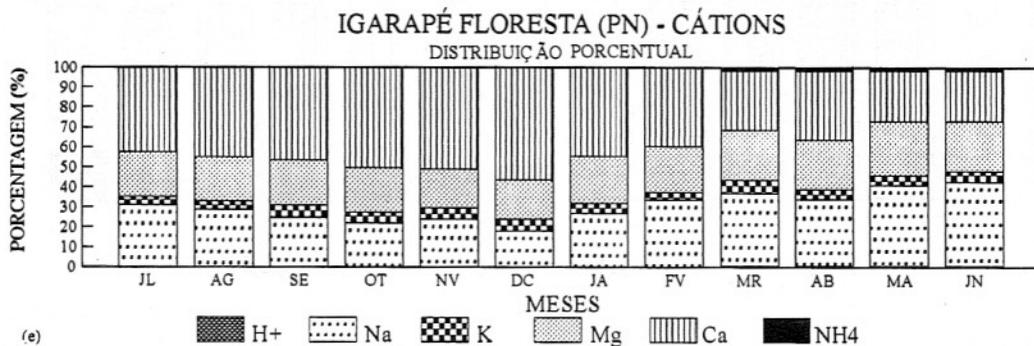


Figura 5 - Continuação.

observadas não podem ser atribuídas à variação sazonal.

O cálcio é o cátion que domina as cargas positivas das soluções analisadas, apresentando um aumento do percentual nessas águas, durante a transição para o período mais chuvoso, entre outubro e dezembro. Esse comportamento altera a contribuição do cálcio para o total dos cátions, evidenciando uma forte contribuição atmosférica na forma de deposição seca. O aumento dos percentuais de cálcio é acompanhado por uma redução proporcional nos percentuais de sódio, em todas as soluções analisadas. Durante o período seco, o ar mais seco e o solo exposto permitem uma maior ressuspensão de poeira do solo e, portanto, a presença de maior quantidade de espécies químicas de origem do solo presentes na atmosfera. Por outro lado, durante esse período, as entradas de espécies com forte componente marinho, como o sódio, são menores, devido à diminuição da precipitação que, nessa região, devido às características climáticas, são predominantemente de origem marinha.

A contribuição do NH_4^+ para o total de cargas catiônicas varia entre 0%, durante o período mais chuvoso, e 4%, durante os meses de transição entre o período chuvoso para o seco nas águas do Igarapé (PN e PF). Para as precipitações (C e TR), o padrão é semelhante, i.e., percentual menor (0%), durante os meses mais chuvosos (janeiro/fevereiro), e maiores, durante os meses de transição, atingindo valores percentuais de até 8%.

No geral, observa-se que a distribuição das cargas positivas tem a proporção alterada ao longo do ano, sendo que o equilíbrio dessas cargas é des-

locado para o Ca^{2+} durante os meses de novembro a janeiro (transição do período mais seco para o chuvoso).

Como visto anteriormente, as diferenças no balanço de cargas podem ser atribuídas aos ânions orgânicos e, portanto, a análise das contribuições percentuais de cada um deles para o total de cargas aniônicas mostra que os mesmos dominam percentualmente nessas águas, exceção feita nas águas da foz do Igarapé (PF). Entretanto, como não foram efetuadas medidas de Carbono Orgânico Total (TOC) nas amostras coletadas, a interpretação dos dados foi elaborada com base nas cargas aniônicas efetivamente medidas.

Entre os ânions medidos, Cl^- é o dominante, exceto em PF, onde dominam os ânions geradores de alcalinidade. Durante os meses menos chuvosos, a variação mensal na proporção da carga desse ânion é significativa na transprecipitação, devido ao aumento na deposição seca. Na foz do Igarapé (PF), observa-se uma alteração da distribuição percentual dos ânions; o percentual de Cl^- diminui enquanto o percentual de SO_4^{2-} (oriundo do intemperismo) aumenta, sendo que o Cl^- apresenta um percentual menor durante os meses mais chuvosos.

A contribuição percentual da carga do nitrato é significativa na precipitação (C), diminuindo nas outras soluções (TR, PN e PF); nessas soluções, os valores percentuais são equivalentes. Durante o período mais chuvoso, os percentuais das cargas de nitrato nas águas do Igarapé (PN e PF) são, em média, 50% maiores do que no período mais seco. Entretanto, nas águas de chuva (C), o comportamento desse íon é o inver-

so. Esse comportamento evidencia que o equilíbrio de cargas se desloca para outro ânion e que o nitrato está sendo retido pelo sistema.

O SO_4^{2-} é o ânion que apresenta o maior intervalo de variação na precipitação, entre 12% e 28%, refletindo a forte dependência com o volume precipitado. Na transprecipitação, esse intervalo de variação é menor, em consequência da interação com a vegetação, sendo, o valor médio desses percentuais, em torno de 16%. Nas águas do Igarapé (PN), ao longo do ano, cerca de 8% da carga aniônica deve-se ao sulfato, não apresentando qualquer evidência de sazonalidade. Nas águas da foz (PF), o SO_4^{2-} é o ânion com maior contribuição percentual, apresentando uma sazonalidade acentuada. Durante períodos de alta precipitação, ele representa 60% e, durante o período de baixa, representa 35% das cargas aniônicas nas águas exportadas da bacia.

A variação anual dos valores das contribuições percentuais das cargas das espécies químicas analisadas, no ambiente natural, podem ser associadas, principalmente, à variação na quantidade de água circulando na bacia. Entretanto, nas águas da foz da bacia, com contribuição da área alterada, o componente aniônico se desloca para o SO_4^{2-} , induzido pelo intemperismo existente nessa área da bacia. A saída de SO_4^{2-} da área degradada da bacia pode ser associada à perda dos cátions, mantendo, assim, o equilíbrio entre as cargas.

O inventário mensal das espécies químicas estudadas

Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, são apresentados os inventári-

Tabela 2 - Inventário mensal para as entradas das espécies químicas através da precipitação (C) em kg/ha x 10⁻².

C	PREC	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	mm		kg/ha	x 10 ⁻²						
JL/93	36,27	5,92	18,1	7,61	4,84	48,6	1,14	26,4	2,49	11,9
AG	17,17	5,49	16,7	6,96	3,58	18,2	0,70	25,9	7,74	11,2
SE	50,85	6,10	31,0	21,5	11,2	119	2,00	46,1	13,7	25,8
OT	42,74	5,83	25,6	15,0	9,51	94,8	1,33	44,3	22,0	24,1
NV	45,18	5,38	35,8	17,2	12,3	128	-	34,8	22,0	18,7
DC	42,50	5,40	26,1	22,5	15,5	169	0,24	22,2	4,84	12,8
JA/94	70,59	5,30	22,9	38,7	32,0	337	-	36,3	3,44	12,5
FV	88,50	5,32	34,2	8,80	9,55	92,8	-	45,0	30,2	13,3
MR	69,63	5,07	81,3	22,1	11,5	35,7	2,41	51,4	5,25	19,6
AB	55,23	5,21	34,7	46,4	7,17	52,9	2,80	42,2	0,59	30,1
MA	94,73	5,09	15,2	14,6	11,3	45,6	5,52	26,8	3,69	5,17
JN	56,40	4,80	15,8	13,8	6,13	28,1	6,86	23,4	1,75	8,19

Tabela 3 - Inventário mensal para as entradas das espécies químicas através da transprecipitação (TR) em kg/ha x 10⁻².

TR	Prec	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	mm		kg/ha	x 10 ⁻²						
JL/93	37,50	5,99	63,6	104	16,0	61,2	0,55	71,9	0,32	26,1
AG	24,33	6,46	71,4	70,6	12,8	55,4	11,5	70,2	5,59	30,2
SE	40,90	6,49	89,0	98,9	18,4	119,0	7,14	97,3	7,05	36,6
OT	32,74	6,59	62,3	70,6	12,4	83,8	11,4	63,6	7,51	30,6
NV	44,18	6,37	91,5	74,3	24,7	218,0	5,69	53,4	5,31	28,3
DC	38,72	6,01	70,3	74,3	20,4	183,0	0,82	71,9	6,46	32,3
JA/94	67,00	5,86	98,5	74,9	12,7	90,8	3,01	79,1	7,41	43,1
FV	77,46	5,90	87,5	66,1	15,8	132,0	0,16	68,9	1,92	29,7
MR	65,70	5,74	89,8	73,4	16,6	84,8	3,38	89,1	6,23	32,9
AB	49,30	6,01	72,4	58,2	12,0	59,9	5,66	57,7	3,63	26,8
MA	94,30	5,76	75,0	64,0	18,0	61,6	6,01	92,0	18,7	41,1
JN	44,68	5,97	115	42,5	10,5	34,0	4,66	39,2	5,12	19,8

Tabela 4 - Inventário mensal para as saídas das espécies químicas através da área de floresta (PN) em kg/ha x 10⁻².

PN	Vazão	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	mm		kg/ha	x 10 ⁻²						
JL/93	9,42	6,51	19,4	6,15	9,67	28,4	0,23	27,1	0,36	1,85
AG	9,35	6,49	20,6	6,64	11,0	36,3	0,2	27,2	1,27	6,68
SE	6,75	6,61	15,4	6,51	9,01	31,0	0,24	19,5	0,58	5,15
OT	9,38	6,66	22,6	8,56	13,1	51,4	0,46	27,3	0,95	7,45
NV	10,29	6,71	25,7	9,25	13,4	51,4	0,09	30,1	1,87	8,31
DC	15,40	6,52	39,3	19,5	24,9	120	0,11	45,0	3,8	11,7
JA/94	13,35	6,44	31,3	10,1	16,7	49,2	-	37,2	1,14	5,81
FV	18,93	6,28	38,4	10,4	16,3	48,4	0,02	50,8	5,45	12,3
MR	21,98	6,06	31,2	10,9	18,3	32,3	1,47	53,0	18,9	14,4
AB	22,62	6,30	42,3	9,28	19,8	47,8	1,23	61,4	8,05	14,9
MA	22,67	6,09	32,7	9,19	17,4	25,6	1,61	62,4	9,78	15,0
JN	27,99	6,20	43,2	10,0	21,3	30,5	1,34	62,8	10,7	13,9

os mensais, em kg/ha, das espécies estudadas para cada uma das soluções. A variação mensal das razões de massa entre os diferentes compartimentos são calculadas a partir dessas tabelas e os intervalos desses valores para os diferentes íons são mostrados na Tabela 6.

Na transprecipitação, as espécies químicas são enriquecidas ($C/TR < 1$) ao atravessar as copas das árvores, exceto para o NO_3^- . O Ca^{2+} , durante os meses menos chuvosos, é oriundo, principalmente, da precipitação ($C/TR \approx 1$); o K^+ e o Mg^{2+} têm um enriquecimento maior, durante os meses mais chuvosos, devido à lixiviação da vegetação; como exemplo, na Figura 6a, é mostrada a va-

riação mensal dos valores de C/TR para o K^+ , Ca^{2+} e o NO_3^- . O Cl^- não apresenta variação significativa ao longo do ano, apresentando-se igualmente enriquecido em todos os meses. O enriquecimento do NO_3^- na transprecipitação ocorre nos meses de precipitação mais alta, exceto em janeiro (um dos meses mais chuvosos do ano). Essa diferença de comportamento pode ser atribuída a uma fonte extra dessa espécie na atmosfera; sabe-se que esse íon é gerado por descargas elétricas. Como em janeiro esse fenômeno é comum na região, é possível atribuir-se o aumento dos teores de NO_3^- na precipitação, durante o mês de janeiro, às tempestades elétricas (Berner &

Berner, 1987). Nos meses de menor precipitação, o NO_3^- deve estar sendo retido diretamente pelas copas das árvores (Parker, 1983).

Analisando-se a razão C/PN , que fornece a proporção entre entradas através da água de chuva e saídas da área natural da bacia, verifica-se que o sistema está exportando ($C/PN < 1$), principalmente, o Mg^{2+} . Para as outras espécies químicas, observa-se que existe retenção, durante os meses menos chuvosos, e exportação, durante os meses mais chuvosos (Fig. 6b). Se a comparação é feita entre as entradas, através da chuva, e as saídas, através da foz (C/PF), englobando, portanto, a área degradada, verifica-

Tabela 5 - Inventário mensal para as saídas das espécies químicas através da área total, na foz do igarapé (PF) em $kg/ha \times 10^{-2}$

PF	Vazão	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	mm		kg/ha	x10 ⁻²						
JL/93	22,34	7,01	41,7	20,1	21,2	66,2	1,94	65,1	13,9	156
AG	22,77	7,14	45,0	23,5	23,6	76,0	1,48	62,6	10,8	144
SE	20,77	7,13	42,2	23,4	30,8	71,4	2,25	60,9	7,64	137
OT	13,48	7,13	28,1	18,4	16,7	63,9	0,98	40,1	6,20	89,0
NV	18,47	7,06	36,5	25,4	20,6	64,9	0,67	51,2	8,48	135
DC	17,17	6,86	35,0	23,3	26,2	92,7	2,79	47,0	11,5	178
JA/94	23,86	6,82	45,2	28,0	31,4	104	4,22	63,4	12,5	389
FV	27,99	6,77	48,5	26,0	26,2	84,6	1,94	65,6	16,9	219
MR	43,53	6,59	70,3	298	37,8	112	9,77	104	27,5	432
AB	39,05	6,69	64,7	46,2	43,1	93,5	4,70	98,9	26,6	459
MA	59,38	6,59	91,7	66,1	51,3	114	10,7	137	41,3	588
JN	50,85	6,50	83,1	60,8	50,3	108	11,2	125	48,6	560

Tabela 6 - Intervalos da variação mensal das razões de massa entre os diferentes compartimentos: C (precipitação), TR (transprecipitação), PN (igarapé área natural) e PF (foz do igarapé).

	C/TR	C/PN	C/PF	TR/PN	TR/PF
Na ⁺	0,14 - 0,90	0,37 - 2,02	0,17 - 1,16	1,71 - 5,80	0,82 - 2,51
K ⁺	0,07 - 0,80	0,84 - 5,00	0,07 - 1,38	3,71 - 16,9	0,25 - 5,15
Mg ²⁺	0,28 - 2,52	0,29 - 1,91	0,12 - 1,02	0,49 - 2,04	0,21 - 1,19
Ca ²⁺	0,33 - 3,72	0,50 - 6,86	0,26 - 3,26	1,12 - 4,23	0,31 - 3,36
Cl ⁻	0,29 - 0,73	0,37 - 2,37	0,19 - 1,10	0,62 - 5,00	0,31 - 1,59
NO ₃ ⁻	0,16 - 15,8	0,07 - 23,9	0,02 - 3,55	0,18 - 12,3	0,02 - 1,21
SO ₄ ²⁻	0,13 - 1,12	0,34 - 6,45	0,01 - 0,27	1,43 - 14,1	0,04 - 0,34

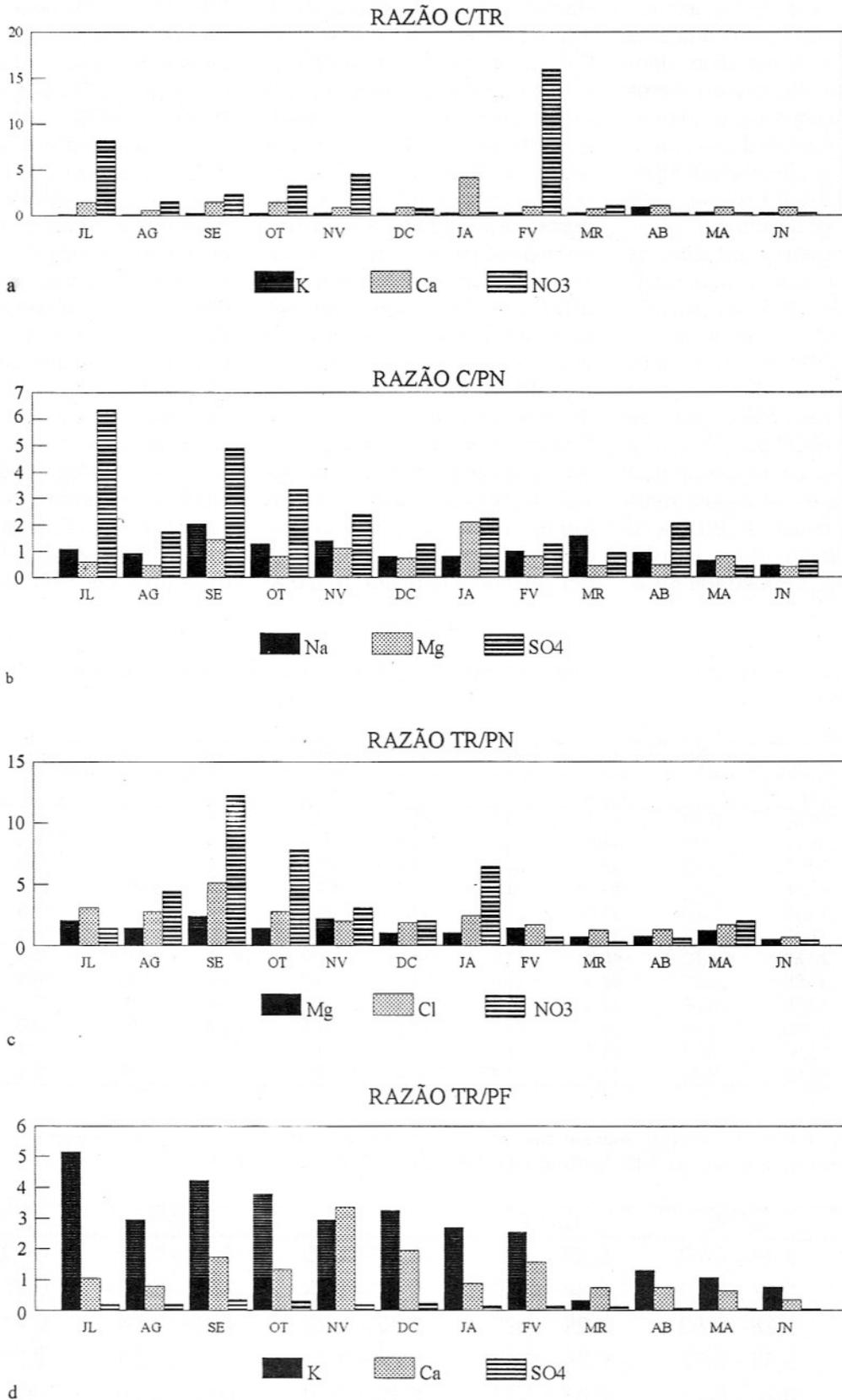


Figura 6 - Razão entre as entradas e saídas de espécies químicas, na bacia do igarapé Pedra Preta, para: (a) C/TR (chuva/transprecipitação - K^+ , Ca^{2+} e NO_3^-); (b) C/PN (chuva/igarapé floresta - Na^+ , Mg^{2+} e SO_4^{2-}); (c) TR/PN (transprecipitação/igarapé floresta - Mg^{2+} , Cl^- e NO_3^-) e (d) TR/PF (transprecipitação/igarapé foz - K^+ , Ca^{2+} e SO_4^{2-}).

se que, ao longo do ano, estão sendo exportados, através dessas águas, principalmente, o Na^+ , o K^+ , o Mg^{2+} , o Cl^- e o SO_4^{2-} . Como mencionado anteriormente, na área degradada, o intemperismo é intenso e, devido à presença de sulfetos, o SO_4^{2-} é liberado; junto com esse ânion, os cátions devem estar sendo liberados, mantendo, assim, o equilíbrio de cargas.

Considerando as saídas pela foz (C/PF), observa-se, também, a retenção de Ca^{2+} e NO_3^- durante os meses de menor precipitação, sendo, os mesmos, exportados durante os outros meses do ano. Fazendo-se essa mesma análise, considerando, como entrada para a bacia, os valores das entradas através da transprecipitação, observa-se que, na área natural da bacia, durante os meses de maior pluviosidade, o Mg^{2+} e o NO_3^- estão sendo exportados; as outras espécies químicas permanecem no sistema durante todo o ano. Esse comportamento é exemplificado para o Mg^{2+} , Cl^- e o NO_3^- na Figura 6c. Na área degradada, todas as espécies, exceto o Na^+ e o K^+ , estão sendo liberadas durante os meses mais chuvosos; o Mg^{2+} e o SO_4^{2-} estão sendo liberados ao longo de todo o ano, com um aumento das quantidades exportadas durante os meses mais chuvosos, enquanto o Cl^- e o Ca^{2+} são liberados, principalmente, na transição entre o período chuvoso para o seco (exemplo para o K^+ , Ca^{2+} e o SO_4^{2-} na Fig. 6d).

Esse padrão de variação entre entradas e saídas através das soluções evidencia que, durante os meses mais chuvosos e com precipitação contínua, o ecossistema está mais sensível a perdas dessas espécies químicas, sendo que, mesmo o componente oriundo da ciclagem interna é

menor durante esses meses.

Fica evidente a existência da reciclagem interna dessas espécies, apresentando uma variação ao longo do ano correlacionada ao volume de chuva precipitado sobre a bacia e com a quantidade de água no solo, o que está em acordo com o observado em outras regiões da Amazônia (Forti & Neal, 1992a). Há um enriquecimento acentuado das espécies quando da passagem de PN para PF, o que pode ser explicado pela aceleração dos processos de intemperismo sobre os materiais depositados no curso d'água e que são provenientes da erosão das áreas degradadas (desmatamentos, lago e alterações topográficas na parte jusante da bacia).

CONCLUSÕES

A sazonalidade observada na composição química das águas da bacia estudada pode ser atribuída a dois fatores básicos: a) quantidade de água circulando pela bacia e b) estado fenológico da vegetação. Com relação ao primeiro, um efeito importante é o aumento de poeira em suspensão na atmosfera durante o período seco, fazendo com que as entradas das espécies a ela associada aumente. Do mesmo modo, funcionando, a vegetação, como armadilha dessa poeira, observa-se um enriquecimento maior da composição da transprecipitação. Durante o período chuvoso, devido à grande massa de água circulando no sistema, a quantidade de espécies químicas colocadas em solução, através de processos de lavagem da vegetação, solubilização, intemperismo, etc., também é maior, e algumas espécies, como o magnésio, derivam da lixiviação da vegetação, en-

quanto outras, como o sulfato, resultam da intensificação do intemperismo. O segundo fator controla, principalmente, a quantidade de serapilheira produzida pela vegetação; o máximo de produção ocorre no mês de setembro, o mais seco do ano e, assim que o período das chuvas se estabelece, o processo de decomposição libera uma quantidade maior das espécies, em especial o cálcio. No final do período chuvoso, maio e junho, a exportação de espécies através das águas do igarapé é maior, refletindo um estado de saturação do ambiente, isto é, a capacidade de absorção das espécies parece atingir um limite e, assim, o excedente é liberado. Desse modo, o ecossistema não pode acumular reservas, indicando que, durante os meses mais chuvosos, quando ocorre a exportação de espécies químicas, esse sistema deve ser mais sensível às perturbações de origem antrópicas. Esse fato é importante, por exemplo, para o estabelecimento de um cronograma para recuperação da área. É necessário que tal programa de recuperação seja implementado durante o período de transição entre os meses de alta para baixa precipitação. Desta forma, os nutrientes poderão estar disponíveis para o crescimento vegetal no início do período chuvoso.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com financiamentos da FAPESP No. 92/0209-9, CNPq/PADCTII/CIAMB N°. 62.0375/92.2 e IRDA/Amapá. Devemos agradecer ao Dr. F.G. Santos do IRDA, pelas facilidades oferecidas durante a realização dos trabalhos de campo, e ao Sr. N.M. Pinto, pela execução das coletas de rotina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREAE, M.O.; TALBOT, R.W.; ANDREAE, T.W.; HARRISS, R.C. (1988) Formic and Acetic acid over the Central Amazon region, Brazil, 1, Dry season. *J. Geophys. Res.*, **93**:1616-1624.
- APPELO, C.A. J. & POSTMA, D. (1994) *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam, 536p.
- BERNER, E.K. & BERNER, R.A. (1987) *The Global Water Cycle. Geochemistry and Environment*. Prentice Hall Inc., New jersey, 397p.
- EYROLLE, F.; BENEDETTI, M.F.; BENAÏM, J.Y.; FÉVRIER, D. (1996) The Distribution of colloidal and dissolved organic carbon, major elements and trace elements in small tropical catchment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**:3643-3656.
- FORTI, M.C. & NEAL, C. (1992a) Hydrochemical cycles in tropical rainforest: an overview with emphasis on Central Amazonia. *Journal of Hydrology*, **134**:103-115.
- FORTI, M.C. & NEAL, C. (1992b) Spatial variability of throughfall chemistry in a tropical rainforest (Central Amazonia, Brazil). *The Sci. Tot. Environ.*, **120**:245-259.
- GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (1996) *Amazonian deforestation and climate*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 611p.
- HARRISS, R.C.; WOFSY, S.C.; BECK, S.M.; BENDURA, R.J.; COELHO, J.R.B.; DREWRY, J.W.; HOELL, J.M.; MATSON, P.A.; McNEAL, R.J.; MOLION, L.C.B.; NAVARRO, R.L.; RABINE, V.; SNELL, R.L. (1990) The Amazon boundary layer experiment: wet season 1987. *J. Geophys. Res.*, **95**:16721-16736.
- LACAUX, J.P.; DELMAS, R.; KOVADIO, G.; GROS, B.; ANDREAE, M.O. (1992) Precipitation chemistry in the Mayombé forest of Equatorial Africa. *J. Geophys. Res.*, **97**(d6):6195-6206.
- LESACK, L.F.W. & MELACK, J.M. (1991) The deposition, composition, and potential sources of major ionic solutes in rain of the Central Amazon basin. *Water Resour. Res.*, **27**(11):2953-2977.
- LESACK, L.F.W. & MELACK, J.M. (1996) Mass balance of major solutes in a rainforest catchment in the Central Amazon: Implications for nutrient budgets in tropical rainforest. *Biogeochemistry*, **32**:115-142.
- McDOWELL, W.H. (1991) Nutrient and major element chemistry of Caribbean rain forest streams. *Verh. Internat. Limnol.*, **24**:1720-1723.
- MOLDAN, B. & CERNY, J. (1994) Small Catchment Research. *In*: B. Moldan & J. Cerny (Eds.) *Biogeochemistry of Small Catchment. A tool for environmental research*. John Wiley & Sons, SCOPE **51**(1):1-29.
- PARKER, G.G. (1983) Throughfall and stemflow in the forest cycle. *In*: A. MacFadyen & E.D. Ford (Eds.) *Ecological Research*. Academic Press, London, **13**:58-133.
- PIRES, J.M. & PRANCE, G.T. (1984) The vegetation types of the Brazilian Amazon. *In*: G.T. Prance & T.E. Lovejoy (Eds.) *Amazonia*. Oxford, Pergamon Press, p.109-145.
- RATISBONA, L.R. (1976) The Climate of Brazil. *In*: W. Schwerdtfager (Ed.) *Climates of Central and South America*. New York, Elsevier Scient. Publ. Co., p.219-269.
- SOARES, J.W. & LIMA, L.C. (1994) *Geologia nas imediações do igarapé Pedra Preta, Distrito Manganesífero de Serra do Navio. Relatório - Seção de Geologia da Mina. Indústria e Comércio de Minérios S/A*.
- WEISS, J. (1986) *Handbook of ion chromatography*. Dionex Corp., Sunnyvale, California, USA, 244p.
- WILLIAMS, M.R.; FISHER, T.R.; MELACK, J.M. (1997) Chemical composition and deposition of rain in the central Amazon, Brazil. *Atmos. Env.*, **31**:207-217.