

Fluxos hidrogeoquímicos em águas fluviais de microbacias sob diferentes sistemas agropecuários na Amazônia Oriental

Este artigo apresenta a influência dos sistemas agropecuários sobre os fluxos hidrogeoquímicos em águas fluviais de dezoito microbacias sob diferentes usos da terra na Amazônia Oriental. O Nordeste Paraense é uma das mais antigas áreas de colonização agrícola da Amazônia Oriental e sua paisagem é marcada pela presença de sistemas agropecuários, especialmente uma agricultura subsistência de base familiar, amplas pastagens e mais recentemente, a monocultura de dendezeiro. Além disso, a paisagem é marcada ainda por florestas secundárias em estágios de sucessão variados e uns poucos fragmentos de floresta primária, geralmente localizados próximos às margens de riachos e rios. O estudo foi conduzido em nove microbacias localizadas nos municípios de Marapanim, Igarapé-açu e São Francisco do Pará pertencentes a Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim e em nove microbacias localizadas nos municípios de Mãe do Rio, Irituia e Capitão Poço pertencentes a Bacia Hidrográfica do Rio Guamá, sendo que quatro microbacias em São Francisco do Pará e Capitão Poço serviram de referência, nas quais a floresta ocupa um mínimo de 85% de suas áreas de drenagem. As campanhas de campo ocorreram ao longo de um ano, de outubro de 2009 a setembro de 2010. Amostras de águas fluviais foram coletadas e transportadas em caixas térmicas com gelo para o laboratório, onde posteriormente foram quantificadas suas concentrações iônicas. Durante as campanhas de campo, eram também realizadas a batimetria dos canais e tomadas as medidas de velocidade de corrente para o cálculo da vazão fluvial instantânea. Foi evidenciada a influência dos sistemas agropecuários com uso de fogo (pastagens e cultivos agrícolas no sistema de derruba-e-queima da vegetação de pouso) sobre o aumento dos fluxos de cálcio, magnésio e potássio. Também se observou grande influência das pastagens sobre o fluxo de amônio, especialmente nas microbacias onde o gado adentra os riachos para beber água. Na microbacia onde ocorre uma agricultura mais tecnicada com irrigação e uso de fertilizantes à base nitrogênio, foi observado elevado fluxo de nitrato. Também foi possível observar alguma influência das florestas nos fluxos de sódio, cloreto, sulfato e nitrato. Assim, ficou evidente que as atividades agropecuárias praticadas na Amazônia Oriental alteram os ciclos naturais de nutrientes, promovendo maiores fluxos destes nas águas fluviais. Análises estatísticas confirmaram tais influências: observou-se uma correlação direta das atividades agropecuárias com as concentrações iônicas das águas fluviais das microbacias estudadas.

Palavras-chave: Fluxo Hidrogeoquímico; Águas Fluviais; Sistemas Agropecuários; Microbacias.

Hydrogeochemical fluxes in river waters of microcatchments under different farming systems in the Eastern Amazon

This article presents the influence of agricultural systems on the hydrogeochemical fluxes in stream waters, of eighteen small catchments under different land use in the Eastern Amazon. The Northeast of Pará is one of the oldest areas of agricultural colonization in the Eastern Amazon and its landscape is dominated by the presence of farming systems, especially a family-based subsistence agriculture, large pasture areas and, more recently, a monoculture of palm oil trees. In addition, the landscape is also characterized by secondary forests in various stages of succession and a few fragments of primary forest, usually located close to streams and rivers. The study was carried out in nine catchments located in the municipalities of Marapanim, Igarapé-açu and São Francisco do Pará, inserted in the Marapanim River Basin and in nine micro-basins located in the municipalities of Mãe do Rio Irituia and Capitão Poço, inserted in the Guamá River Basin. The four catchments in São Francisco and Capitão Poço served as references, in which the forest occupies at least 85% their drainage areas. Field campaigns occurred during one year, from October 2009 to September 2010. Streamwater samples were collected and transported in ice boxes to the laboratory, where later water ionic concentrations were quantified. During the field campaigns, channel bathymetry were done and current speed was measured to calculate the instantaneous discharge. It was confirmed the influence of the agricultural systems which use fire (pastures and crops in the slash-and-burn system) on the fluxes of calcium, magnesium and potassium. We also observed a large influence of pasture on ammonium fluxes, especially in the watersheds where cattle enter into the streams to drink water. In the catchment where there is a more technician agricultures apply irrigation and nitrogen fertilizers, it was observed a higher nitrate flux. It was also possible to observe some influence of the forests in the fluxes of sodium, chloride, sulfate and nitrate. Thus, it was evident that the agricultural activities in the microbasins in the Eastern Amazon alter the natural nutrient cycles, promoting higher fluxes of these nutrients in the streamwater. Statistical analyzes confirmed such influences: it was observed a direct correlation of agricultural activities with streamwater ionic concentrations in the studied catchments.


Keywords: Hydrogeochemical Fluxes; Stream Water; Agricultural Systems; Catchments.


Topic: **Engenharia Ambiental**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Received: **10/02/2018**


Approved: **24/03/2018**

Daniel Fernandes Rodrigues Barroso 
Instituto Federal do Maranhão, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1096770650777976>
<http://orcid.org/0000-0001-9452-8356>
daniel.ferbarroso@gmail.com

Ricardo de Oliveira Figueiredo 
Universidade Federal do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2388049759708934>
<http://orcid.org/0000-0002-0933-4854>
ricardo.figueiredo@embrapa.br

Camila da Silva Pires
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8567060362596890>
camilapires.ambiental@gmail.com

Fabiola Fernandes Costa
Universidade Federal do Pará, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3922767518319126>
fabiolaffc@yahoo.com.br

Pedro Gerhard 
Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5621269098705408>
<http://orcid.org/0000-0002-5630-6952>
pedro.gerhard@embrapa.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0017

Referencing this:

BARROSO, D. F. R.; FIGUEIREDO, R. O.; PIRES, C. S.; COSTA, F. F.; GERHARD, P.. Fluxos hidrogeoquímicos em águas fluviais de microbacias sob diferentes sistemas agropecuários na Amazônia Oriental. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.9, n.3, p.204-218, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0017>

INTRODUÇÃO

O bioma amazônico é caracterizado por uma densa floresta tropical úmida que possui uma enorme biodiversidade, abundância de águas fluviais e muitas riquezas minerais no seu subsolo. Grande parte da floresta amazônica brasileira permaneceu praticamente intacta até o início da era 'moderna' do desmatamento, que foi intensificado com a inauguração da rodovia Transamazônica, em 1970.

Atualmente a cobertura do solo na Amazônia é dominada por três tipos de paisagem: floresta primária, floresta secundária (capoeiras em diversos estágios de sucessão) e pastagem (SALIMON et al., 2003). Localizada na Amazônia oriental, a mesorregião Nordeste Paraense representa um importante polo agropecuário da economia paraense (REBELLO et al., 2011), principalmente a agricultura itinerante de derruba e queima da vegetação secundária ou de pousio (localmente denominada como capoeira) e formação de amplas pastagens. Por exemplo, em três microbacias hidrográficas no Nordeste Paraense avaliadas por Watrin et al. (2009), áreas de floresta secundária em estágios sucessionais iniciais foram mais representativas em duas das três microbacias, e pastagens representaram o padrão dominante de uso da terra em todas as três microbacias, com predominâncias da classe pasto sujo.

As atividades agropecuárias podem causar vários impactos sobre o meio ambiente e para os recursos hídricos. Os impactos ambientais de atividades agropecuárias decorrem principalmente de fatores, segundo Sambuichi et al. (2012): da mudança do uso do solo, resultante do desmatamento e da conversão de ecossistemas naturais em áreas cultivadas, e da degradação das áreas cultivadas, causada por práticas de manejo inadequadas. Vários autores citam diferentes impactos sobre os recursos hídricos provenientes de atividades agropecuárias. Por exemplo: Markewitz et al. (2001) citam que o desmatamento, a queima da floresta e a implantação de pastagens alteram os fluxos de nutrientes nos ecossistemas amazônicos. E essas mudanças nos fluxos de nutrientes podem refletir em impactos sobre a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Os efeitos das mudanças de usos da terra para a implantação de atividades agropecuárias são refletidos principalmente sobre os rios menores (de 1ª e 2ª ordem), segundo Krusche et al. (2005). As atividades agrícolas são importantes fontes de poluição das águas, pois os sedimentos oriundos da erosão de solos e sobrepastejo (MILLER-JUNIOR, 2008), aliadas ao uso de pesticidas e fertilizando contribuem para a contaminação das fontes de águas. A contribuição das atividades agropecuárias como fonte de nutrientes e poluentes para os igarapés (denominação regional para os riachos amazônicos) pode ocorrer também, via escoamento superficial de água da chuva em solos de pastagens (TELES et al., 2006). As atividades agrícolas também são associadas à salinização da água superficial, eutrofização de corpos hídricos, contaminação por agrotóxicos nos compartimentos solo e água, e alterações dos padrões de erosão e sedimentação nas bacias (BRASIL, 2011). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos sistemas agropecuários sobre os fluxos hidrogeoquímicos em 18 microbacias na Amazônia Oriental.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização das microbacias

A localização da área de estudo é apresentada na Figura 1. A Área 1 refere-se à mesobacia dos igarapés contíguos Buiúna e Timboteua, pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Marapanim, e fica localizada nos municípios de Marapanim e Igarapé/Açu. Já a Área 3 é a mesobacia do Igarapé Peripindeua, uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Guamá, localizada nos municípios de Mãe do Rio e Irituia. Nas Áreas 2 e 4, microbacias localizadas em São Francisco e Capitão Poço, respectivamente, predominam remanescentes florestais, que ocupam área superior a 85% da área total de cada uma dessas microbacias, sendo assim escolhidas como áreas de referência para o presente estudo. A Área 2 pertence a Bacia de Marapanim e a Área 4 pertence a Bacia do Guamá.

Neste estudo, foram avaliadas dezoito microbacias localizadas nessas quatro áreas. Nove dessas microbacias situam-se na bacia do Rio Marapanim, sendo que sete localizam-se na área da mesobacia dos igarapés contíguos Buiúna e Timboteua (Área 1), e as outras duas microbacias pertencem a mesobacia do Rio Inhaga (Área 2); estas serviram de referências por estarem concentradas em fragmentos de florestas em bom estado de conservação. As demais nove microbacias estão na Bacia do Rio Guamá, sendo sete localizadas na área da mesobacia do Igarapé Peripindeua (Área 3), enquanto que as outras duas microbacias pertencem a mesobacia do Rio Arauaí (Área 4) e serviram de referência por estarem localizadas em fragmento florestal em bom estado de conservação.

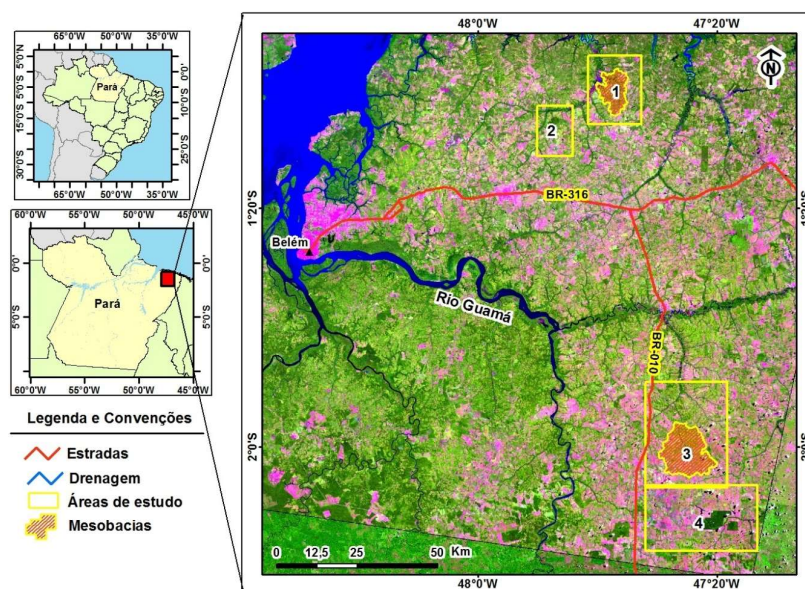


Figura 1: Localização das quatro áreas alvos deste estudo: 1 (Mesobacia dos igarapés contíguos Buiúna e Timboteua); 2 (Área de referência que contém duas microbacias contribuintes do Rio Inhaga); 3 (Mesobacia do Igarapé Peripindeua); e 4 (Área de referência que contém duas microbacias contribuintes do Rio Arauaí).

Para a análise das características ambientais das áreas estudadas, as duas mesobacias correspondentes às áreas 1 e 3 foram segmentadas em microbacias, com a utilização da ferramenta SWAT2000 (LUZIO et al., 2002), tendo como base a hidrografia digitalizada de cartas topográficas em escala 1:100.000. Esta delimitação foi baseada em um Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT) determinado a partir de dados da Shuttle Radar Topography Mission - SRTM. As análises foram feitas de modo a delimitar microbacias com áreas entre dezenas e poucas centenas de hectares (entre 20-350 hectares). O predomínio de uma classe de uso da terra foi determinado a partir da inspeção visual de limite das microbacias

sobreposto a composições coloridas (baseadas em imagens de Satélite Landsat, sensor TM, RGB345) sobre as áreas das mesobacias, além da checagem de campo.

Assim, foram selecionadas 18 microbacias nessas quatro áreas. As microbacias pertencentes à Marapanim receberam os códigos de M1 a M7 (na mesobacia dos igarapés Buiúna e Timboteua) e as referências foram codificadas como MR1 e MR2. Já as microbacias do Guamá foram codificadas de G1 a G7 (na mesobacia do Igarapé Peripindeua) e as referências receberam os códigos GR1 e GR2. Os códigos das microbacias, o nome dos igarapés, as coordenadas geográficas, a área de cada microbacia e o uso predominante em de cada microbacia do presente estudo estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1: Código das microbacias, nome do igarapé, coordenadas geográficas, área de drenagem da microbacia e uso da terra predominante nas microbacias das áreas de estudadas.

| Código das microbacias | Igarapé | Latitude | Longitude | Área (ha) | Uso da terra predominante |
|------------------------|---------------------|---------------|---------------|-----------|---------------------------|
| M1 | Sem nome | 01°03'16.19"S | 47°36'30.86"W | 37,55 | Agropecuária |
| M2 | Buiúna | 01°01'30.20"S | 47°38'22.95"W | 42,49 | Agropecuária |
| M3 | Pachibá | 01°00'24.20"S | 47°37'58.08"W | 63,79 | Agropecuária |
| M4 | Pirapema | 00°57'40.61"S | 47°35'15.86"W | 48,67 | Agropecuária |
| M5 | Breu | 01°00'44.32"S | 47°39'01.82"W | 113,80 | Agropecuária |
| M6 | Ubim | 00°59'36.08"S | 47°38'42.59"W | 29,61 | Agropecuária |
| M7 | Passagem | 01°00'11.79"S | 47°37'35.23"W | 140,72 | Agropecuária |
| MR1 | Sem nome | 01°06'31,12"S | 47°47'43,33"W | 21,76 | Floresta |
| MR2 | Sem nome | 01°05'34,48"S | 47°48'20,57"W | 105,75 | Floresta |
| G1 | Seringa | 02°03'03,62"S | 47°21'57,11"W | 59,42 | Agropecuária |
| G2 | Tributário do Areia | 02°03'00,76"S | 47°24'04,97"W | 113,81 | Agropecuária |
| G3 | Divisa | 02°04'06,25"S | 47°23'55,30"W | 63,79 | Agropecuária |
| G4 | Areia | 02°04'08,41"S | 47°24'27,55"W | 114,15 | Agropecuária |
| G5 | Muquém | 02°02'48,15"S | 47°28'06,62"W | 149,16 | Agropecuária |
| G6 | Chico Lopes | 02°02'26,98"S | 47°26'55,56"W | 33,78 | Agropecuária |
| G7 | Puraquê | 01°58'05,47"S | 47°26'22,83"W | 29,79 | Agropecuária |
| GR1 | Golpe | 02°12'33,77"S | 47°17'40,81"W | 334,47 | Floresta |
| GR2 | Água Fria | 02°11'53,66"S | 47°19'57,29"W | 229,35 | Floresta |

Procedimentos de campo e de laboratório

As campanhas de campo foram realizadas mensalmente no período de outubro de 2009 a setembro de 2010, perfazendo 12 coletas de amostras de água fluvial em cada ponto de amostragem relativos aos dezoito igarapés das microbacias avaliadas. As coletas de água fluvial para análise dos cátions - cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+) e amônia (NH_4^+) - e dos ânions - cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) e fosfato (PO_4^{3-}) - foram realizadas por meio da imersão, a 20-25 cm da coluna d'água, de frascos de polipropileno de boca larga (capacidade de 250 mL), previamente lavados com solução ácida (HCl 10%) e água deionizada ultrapura (Milli-Q). Estes frascos eram totalmente preenchidos com amostras de água dos igarapés visando minimizar a presença de ar no interior da garrafa e, em seguida, conservados sob refrigeração até o momento das análises laboratoriais (SÃO PAULO, 2011).

Após cada coleta, as amostras eram trazidas ao laboratório na EMBRAPA Amazônia Oriental, em Belém/PA onde eram filtradas através de membranas de policarbonato (diâmetro do poro = 0,4 μm ; diâmetro da membrana = 47 mm; marca Millipore) em kit de filtração de polipropileno (Sterifil Aseptic System, da Millipore), utilizando uma bomba a vácuo livre de óleo lubrificante (marca Gast), sendo estocadas

a 4°C em refrigerador, até as análises no cromatógrafo iônico (Dionex DX-120, acoplado ao amostrador automático Dionex AS-40). Neste equipamento as espécies químicas, após interação com coluna analítica específica (Ion Pac AS 22, para ânions, e Ion Pac CS 12, para cátions), são medidas por um detector de condutividade.

Paralelamente às coletas de amostras, eram realizadas batimetria dos igarapés para o cálculo da vazão por meio de dois métodos distintos: em canal fluvial livre e em canal com vazão regulada por tubo. O método em canal livre consiste na divisão do canal em subsecções para medição da profundidade, largura e a velocidade da corrente em cada uma delas. As medidas de profundidades foram tomadas a cada 50 cm, desde uma a outra margem do canal fluvial. Em cada subsecção foi calculada a área da seção molhada e a vazão. A vazão total em cada seção foi tomada pela somatória das vazões das subsecções. Os perfis verticais de cada igarapé eram representados em papel milimetrado tamanho A2 para o cálculo de área de cada subsecção e da seção. O cálculo da vazão foi realizado através da equação $Q=A*V*1000$, Onde: Q é a vazão em L s⁻¹; A é a área da seção transversal em m²; e V é a velocidade da corrente em m s⁻¹.

O método para canal com vazão regulada por tubo consiste em calcular a vazão em meia seção de um tubo, conforme o manual do correntômetro Global Water disponível no item 1.3 (GLOBAL WATER, 2004). Este método era realizado em igarapés, cuja o trecho era canalizado por meio de tubulação de concreto sobre as estradas de terra, muito comum na região. A medida da velocidade da corrente foi realizada utilizando um correntômetro digital da marca Global Water, modeloFP201.

Analise estatística

Para a verificação da relação entre os fluxos hidrogeoquímicos e o uso e a cobertura da terra nas microbacias foi aplicada o teste de correlação de Spearman, uma vez que a distribuição dos dados hidrogeoquímicos não era normal. Dessa maneira, foi avaliada a correlação entre as concentrações iônicas medidas nas águas fluviais e os percentuais das classes de uso da terra observados nas microbacias de drenagens.

Estimativa dos fluxos de massa

O cálculo dos fluxos hidrogeoquímicos de cada microbacia estudada foi realizado a partir dos dados de concentração de íons dissolvidos e de vazão obtidos. Considerou-se a vazão e a concentração constantes para cada campanha desde o período de 15 dias que a antecedeu até a campanha seguinte, totalizando cerca 30 dias de mesma concentração para fins desta estimativa. O fluxo de massa foi extrapolado para um ano, somando-se os fluxos hidrogeoquímicos mensais e, normalizado por área de um hectare, dividindo-se pela área total da microbacia, e então representados em kg.ha⁻¹.ano⁻¹. Os fluxos de massa mensais foram então calculados segundo a equação, abaixo:

$$Fm = (C * Q * 86.400.T)/1000000$$

Onde:

F_m: fluxo de massa em kg.mês⁻¹;

C: Concentração em mg.L⁻¹;

Q: vazão em $L \cdot s^{-1}$;

T: Tempo em dias

86.400 é o fator de conversão de unidades de segundo para dia
1.000.000 é o fator de conversão de unidades ($mg \cdot mês^{-1}$ para $kg \cdot mês^{-1}$)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados coletados por meio das medidas de campo e dos procedimentos laboratoriais, e posterior análise estatística, são apresentados a seguir os resultados obtidos e discutidas as implicações dos mesmos em relação aos objetivos desta pesquisa.

Hidrologia das microbacias

A figura 2 apresenta a precipitação mensal ocorrida nas mesobacias alvos deste estudo. Nas mesobacias do Marapanim (Buiúna-Timboteua e Inhangá), a precipitação ao longo do ano hidrológico considerado foi de 2.051,20 mm, sendo que no mês mais chuvoso (abril de 2010) a precipitação foi de 400,40 mm, enquanto que no mês de novembro de 2009 não houve precipitação. Esses valores são comparáveis aos medidos na mesma estação meteorológica no período de 1995 a 2009, cuja precipitação média anual registrada foi de 2.500 mm (CORDEIRO et al., 2010).

Nas mesobacias do Guamá (Peripindeua e Arauaí) a precipitação ao longo do ano hidrológico foi bem menor, somando apenas 1.092 mm, com pico de precipitação de 534 mm, no mês de janeiro de 2010, e precipitação mensal mínima de 4 mm, em outubro de 2009. A precipitação desse período estudado foi muito abaixo da média nessa região, que segundo o relatório Estatística Municipal da Fapespa (2016), registra chuva anual na faixa de 2.250 mm a 2.500 mm para a região de Mãe do Rio e Capitão Poço.

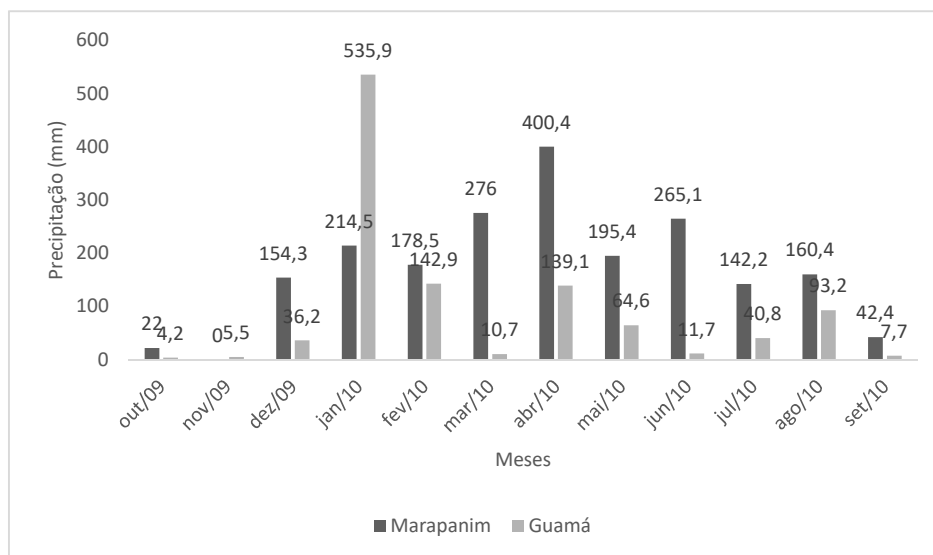


Figura 2: Precipitação (P) mensal e total nas mesobacias estudadas nas bacias hidrográficas dos rios Marapanim (Buiúna-Timboteua e Inhangá) e Guamá (Peripindeua e Arauaí), onde estão localizadas as microbacias alvo deste estudo. Os dados de chuvas são de duas estações pluviométricas: uma na estação experimental localizada na latitude $01^{\circ}12'S$ e longitude $47^{\circ}36'W$, na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Igarapé-Açu, e a outra na latitude $-02^{\circ}25'34''S$ e longitude $-47^{\circ}31'58''W$, na Fazenda São Raimundo, em Ipixuna do Pará, da ANA.

O gráfico apresentado na Figura 3 (a) e (b) mostra os valores médios das vazões instantâneas medidas neste estudo nas microbacias do rio Marapanim e do Rio Guamá, no dia das campanhas mensais de campo.

Como se pode observar nessa figura, em Marapanim, a maior vazão média ocorreu em M3 ($78,60 \pm 5,16 \text{ L s}^{-1}$) e a menor em M6 ($9,36 \pm 2,91 \text{ L s}^{-1}$). As microbacias de referência tiveram vazões médias de $43,23 (\pm 5,59) \text{ L s}^{-1}$ na MR2 e $8,41 (\pm 1,52) \text{ L s}^{-1}$ na MR1. Nas microbacias do rio Guamá, observou-se que a maior vazão ocorreu na G4 com $52,84 (\pm 5,02) \text{ L s}^{-1}$, enquanto que na G6 (a menor vazão registrada) foi $8,88 (\pm 3,67) \text{ L s}^{-1}$. Nas microbacias de referência as vazões médias foram $35,33 (\pm 9,29) \text{ L s}^{-1}$ em GR1 e $24,73 (\pm 2,98) \text{ L s}^{-1}$ em GR2.

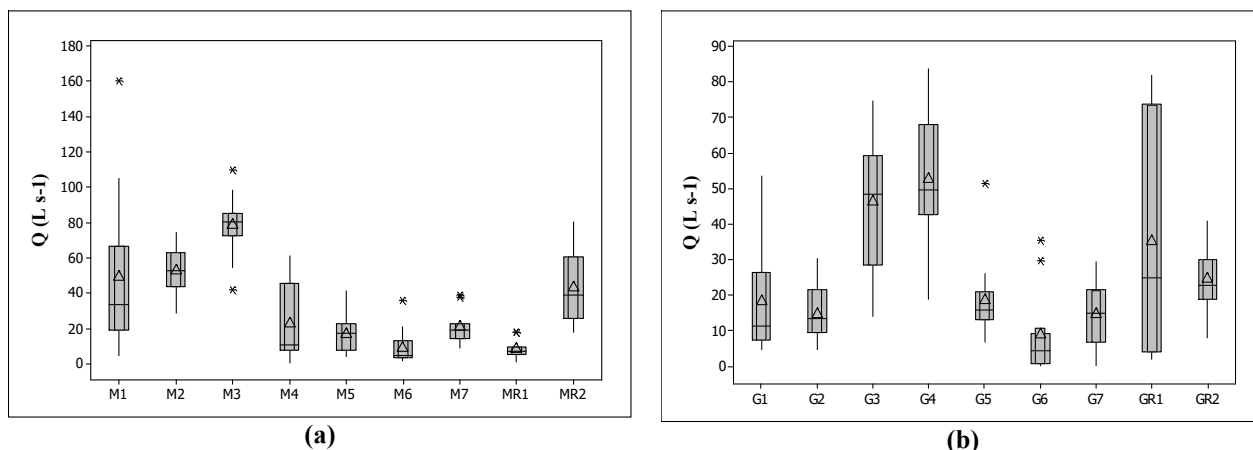


Figura 3: Gráficos do tipo boxplot das vazões (Q) dos igarapés das microbacias de Marapanim (a) e Guamá (b), contendo: mediana (linha que corta a caixa), média (triângulo), interquartis com intervalo de confiança de 95% (caixas em tom de cinza), máximos e mínimos (barras verticais), e valores extremos (asterístico- outliers), n=12, exceto na G6 (n=11).

Usos e cobertura da terra nas microbacias

A tabela 2 apresenta as categorias de uso e cobertura da terra em cada microbacia. As microbacias foram categorizadas nas seguintes classes de uso e cobertura: floresta; pastagem, capoeira alta; capoeira baixa, cultura agrícola, solo exposto, habitações, vegetação de várzea e ainda água e nuvens (Tabela 2). Com quase 59 ha, a M1 caracteriza-se por ser ocupada predominantemente por pastagem, com 35,9 % da área da microbacia, enquanto que capoeira alta e capoeira baixa somam 36,84%, cultura agrícola corresponde a 19,06%, e floresta apenas a 1,01%. A microbacia M2 possui 76,75 ha e é ocupada principalmente por pastagem (com 44,64% ou 34,26 ha), seguida por 21,76% de capoeira baixa, 17,21% de capoeira alta e 13,99% de floresta.

Com uma área de 127,57 ha, a M3 é também principalmente ocupada por pastagem, com 49,99% da área da microbacia, seguida de 21,54% de floresta, 24,60% de capoeira alta e capoeira baixa e apenas 1,73% de área agrícola. A M4 é uma microbacia ocupada primordialmente por pastagem, a qual está presente em mais de 81% de sua área, enquanto que a floresta corresponde a 12,76%. A M5 tem uma área total de 113,80 ha e é ocupada por pastagem (60,59%), capoeira alta (26,50%), capoeira baixa (9,51%), floresta (2,55%) e cultura agrícola (0,23%). A M6 possui 29,61 ha e sua área é ocupada principalmente por pastagem (88,3 %), capoeira alta (7,59%) e cultura agrícola (3,39%). Na M7, assim como nas demais microbacias, a pastagem predomina e ocupa 47,42% da área total da bacia, também ocupada por floresta (11,84%) e capoeira alta (6,89%). O uso e ocupação do solo nessas microbacias seguem a mesma tendência de outras microbacias já estudadas na mesma região, onde predominam áreas de pasto em detrimento das áreas de floresta,

conforme demonstraram Watrin et al. (2010). Por sua vez, nas microbacias de referência predomina floresta: 99,98% na MR1 e 86,62% na MR2, a qual possui 13,04% de capoeira baixa.

A microbacia G1 possui uma área de 59,42 ha e a pastagem predomina como cobertura da terra com 69% de sua área total, seguida pela capoeira alta (14,59%), capoeira baixa (12,28%) e cultura agrícola (2,82%). A G2 possui uma área de 113,81 ha que está ocupada por pastagem com 61,25%, capoeira alta com 21,04% e capoeira baixa com 10,79%. Na G3, há predominância de pastagem em mais de 81% de sua área, enquanto capoeiras alta e baixa somam 8,35% nessa microbacia. Na G4, a porcentagem de pastagem chega a pouco mais de 68%, capoeira alta 8,07%, e floresta 8,05%. A G5 caracteriza-se por conter 92,56% de pastagem. A G6 é ocupada por pastagem em 61,71% de sua área, por capoeiras alta e baixa em 24,34%, e por floresta em 5,38%. Já a G7 é ocupada por pastagem em 56,49% e por floresta em 32,15%. As microbacias de referência, por outro lado, têm 98,78% e 100,00% de floresta em GR1 e GR2, respectivamente.

Tabela 2: Categorias de uso e cobertura da terra nas microbacias estudadas.

| MICROBACIAS | CATEGORIAS DE USO DA TERRA (Ha) | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|--------|
| | F | P | CPA | CPB | CA | SE | H | VV | A | N | T |
| M1 | 0,59 | 21,03 | 16,73 | 4,85 | 11,17 | 3,38 | 0,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 58,59 |
| M2 | 10,74 | 34,26 | 13,21 | 16,70 | 0,00 | 1,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 76,76 |
| M3 | 27,48 | 63,78 | 12,21 | 19,18 | 2,20 | 2,50 | 0,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 127,58 |
| M4 | 6,21 | 39,70 | 0,86 | 0,33 | 0,23 | 1,34 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 48,67 |
| M5 | 2,90 | 68,95 | 30,15 | 10,83 | 0,26 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 113,80 |
| M6 | 0,00 | 26,14 | 2,25 | 0,06 | 1,01 | 0,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,61 |
| M7 | 16,67 | 66,73 | 9,69 | 24,92 | 9,93 | 11,98 | 0,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 140,72 |
| MR1 | 21,74 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 21,76 |
| MR2 | 91,78 | 0,01 | 0,00 | 13,82 | 0,34 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 105,95 |
| G1 | 2,89 | 41,53 | 8,67 | 3,30 | 1,67 | 1,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 59,42 |
| G2 | 0,00 | 69,71 | 23,95 | 12,28 | 2,23 | 0,47 | 0,00 | 5,17 | 0,00 | 0,00 | 113,81 |
| G3 | 2,38 | 73,01 | 4,13 | 3,33 | 1,34 | 2,51 | 0,00 | 1,30 | 0,42 | 0,79 | 89,21 |
| G4 | 9,18 | 77,72 | 9,20 | 2,72 | 1,73 | 2,73 | 0,08 | 0,15 | 0,00 | 10,64 | 114,15 |
| G5 | 0,00 | 138,06 | 3,16 | 2,70 | 0,00 | 2,08 | 0,00 | 3,16 | 0,00 | 0,00 | 149,16 |
| G6 | 1,84 | 21,12 | 2,62 | 5,71 | 0,88 | 1,28 | 0,00 | 0,33 | 0,00 | 0,00 | 33,78 |
| G7 | 9,16 | 16,10 | 0,32 | 1,81 | 0,32 | 0,79 | 0,00 | 1,29 | 0,00 | 0,00 | 29,79 |
| GR1 | 330,40 | 4,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 334,47 |
| GR2 | 229,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 229,35 |

Legenda: F: Floresta; P: Pastagem; CPA: Capoeira Alta; CPB: Capoeira Baixa; CA: Cultura Agrícola; SE: Solo Exposto; H: Habitações; VV: Vegetação de Várzea; A: Água; N: Nuvens; T: Total.

Estimativa dos fluxos hidrogequímicos nas microbacias

Na tabela 3 pode-se observar os fluxos anuais dos íons medidos nos igarapés das microbacias avaliadas neste estudo. O fluxo total de cálcio (Ca^{2+}) nas águas fluviais de todas as microbacias avaliadas em Marapanim somou $57,34 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Sozinho, o igarapé Ubim (microbacia M6), apesar da sua baixa vazão ($9,36 \pm 2,91 \text{ L s}^{-1}$) em relação as demais microbacias em Marapanim (tabela 3), devido aos efeitos da agricultura de derruba e queima, tanto para cultivos agrícolas como para formação de pasto, foi responsável por exportar mais de 32% desse total, enquanto que a soma das duas bacias de referência (MR1 e MR2) foi responsável por apenas $6,43 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, ou 11,21% do total exportado. Esse cátion também foi o que apresentou maior concentração em M6, e isso pode ser explicado pelo uso da terra e pela geologia local. O fluxo de Ca^{2+} em M6 chega a ser seis vezes maior quando comparado com as microbacias florestadas.

Tabela 3: Fluxo de massa anual ($\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) dos cátions e ânions medidos nos igarapés das microbacias avaliadas nas mesobacias do Timboteua/Buiúna e Peripindeua e das microbacias de referência.

| MICROBACIA | Fluxo de Cátions ($\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) | | | | | Fluxo de Ânions ($\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) | | | |
|------------|--|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|---|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | N-NO ₃ ⁻ | P-PO ₄ ⁻³ | N-NH ₄ ⁺ |
| M1 | 9,63 | 9,90 | 45,20 | 10,24 | 74,20 | 22,12 | 19,66 | 0,0489 | 0,67 |
| M2 | 4,08 | 5,03 | 35,93 | 3,67 | 63,01 | 31,43 | 1,91 | 0,0499 | 0,83 |
| M3 | 6,01 | 6,27 | 34,44 | 2,79 | 54,08 | 14,41 | 7,38 | 0,0557 | 0,60 |
| M4 | 9,40 | 5,52 | 18,85 | 8,38 | 34,73 | 9,54 | 1,18 | 0,0247 | 1,98 |
| M5 | 1,29 | 0,82 | 3,02 | 0,52 | 5,24 | 0,71 | 2,37 | 0,0087 | 0,15 |
| M6 | 18,53 | 14,42 | 32,37 | 9,28 | 63,08 | 74,20 | 8,35 | 0,0401 | 0,54 |
| M7 | 1,97 | 1,83 | 9,57 | 1,14 | 15,40 | 63,01 | 0,36 | 0,0074 | 0,35 |
| MR1 | 3,17 | 4,30 | 26,64 | 2,60 | 48,26 | 54,08 | 13,11 | 0,0333 | 0,39 |
| MR2 | 3,26 | 3,60 | 24,17 | 3,20 | 48,04 | 34,73 | 5,82 | 0,0216 | 0,54 |
| G1 | 5,41 | 4,55 | 30,12 | 4,17 | 39,06 | 5,24 | 0,65 | 0,0304 | 0,11 |
| G2 | 3,15 | 1,80 | 8,80 | 3,26 | 13,75 | 63,08 | 0,20 | 0,0132 | 0,17 |
| G3 | 10,11 | 6,96 | 33,83 | 9,26 | 53,98 | 15,40 | 0,72 | 0,0175 | 0,53 |
| G4 | 7,84 | 5,76 | 34,74 | 5,21 | 44,98 | 48,26 | 3,25 | 0,0210 | 0,25 |
| G5 | 21,68 | 2,11 | 6,35 | 2,17 | 14,80 | 48,04 | 0,19 | 0,0038 | 0,28 |
| G6 | 8,90 | 3,17 | 16,25 | 5,08 | 21,35 | 39,06 | 0,16 | 0,0639 | 0,67 |
| G7 | 27,63 | 7,11 | 32,61 | 8,01 | 54,68 | 13,75 | 2,91 | 0,1666 | 0,26 |
| GR1 | 1,56 | 1,57 | 8,57 | 1,27 | 10,88 | 53,98 | 1,01 | 0,0057 | 0,12 |
| GR2 | 1,42 | 1,61 | 9,32 | 1,71 | 14,98 | 44,98 | 1,80 | 0,0131 | 0,29 |

Em Marapanim destaca-se também os fluxos nos igarapés das microbacias M4 e M1, os quais foram bem maiores do que os fluxos das microbacias de referência. A queima do pasto e a aplicação de calcário para a correção do pH de solo de pastagem podem também contribuir para os altos fluxos desse soluto em microbacias com presença de sistema agrícolas onde tais práticas são adotadas (MARTINS, 2005; SARDINHA, 2006; WICKEL, 2007). O percentual de pastagem e de cultivo agrícola na bacia do Marapanim foi correlacionado com cálcio, apresentando correlação direta para pastagem ($r_s = 0,683$ e $\rho=0,000$) e para cultivo agrícola ($r_s = 0,424$ e $\rho=0,000$). Por outro lado, o coeficiente de correlação foi inverso para o percentual de floresta ($r_s = -0,551$ e $\rho=0,000$).

As microbacias avaliadas na bacia do Guamá apresentaram fluxo total de Ca²⁺ igual a 87,70 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Desse total, a microbacia G7 contribuiu com 31,50 % e a G5 foi responsável por 24,72%, embora suas vazões não sejam das maiores dentre as microbacias do Guamá. Esses valores são muito maiores do que os das microbacias de referência (GR1 e GR2), as quais somaram apenas 2,98 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Na bacia do Guamá, a concentração de Ca²⁺ apresentou correlação direta com os percentuais de pastagem ($r_s = 0,349$ e $\rho=0,000$), de capoeira baixa ($r_s = 0,419$ e $\rho=0,000$) e de solo exposto ($r_s = 0,349$ e $\rho=0,000$), mas correlação inversa com o percentual de floresta ($r_s = -0,459$ e $\rho=0,000$). Os fluxos de cálcio nas quatro microbacias florestadas deste estudo (MR1, MR2, GR1 e GR2) são comparáveis aos valores de 2,33 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ encontrados por Cunha, Oliveira e Victoria (1999) em uma microbacia com vegetação natural na Amazônia central.

O fluxo total de magnésio (Mg²⁺) nas microbacias avaliadas em Marapanim foi de 51,69 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, o que é apenas um pouco menor do que o fluxo total de cálcio (tabela 10). Como no caso do cálcio, a M6 foi a que mais contribuiu para fluxo de Mg²⁺ com 14,42 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, o que representa 27,89% do seu total em Marapanim. Destaca-se também a M1, onde os fluxos foram de 9,90 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Já as duas microbacias de referência juntas (MR1 e MR2) contribuíram com 15,28% do total exportado de Mg²⁺. A análise estatística revelou correlação inversa de magnésio com os percentuais de floresta ($r_s = -0,593$ e $\rho=0,000$) e de capoeira

baixa ($r_s = -0,677$ e $p=0,000$), mas correlação direta com os percentuais de pastagem ($r_s = 0,615$ e $p=0,000$) e de cultura agrícola ($r_s = 0,410$ e $p=0,000$).

O fluxo total de Mg^{2+} na bacia do Guamá foi de $34,64 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que todas as microbacias com uso agropecuário, com exceção da G2, apresentaram fluxos maiores do que os fluxos de Mg^{2+} nas microbacias de referência. O maior fluxo de Mg^{2+} ocorreu na G7 com $7,11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, seguida da G3 com $6,96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O fluxo na G7 foi quase sete vezes maior do que nas microbacias de referência, as quais apresentaram valores de $1,57$ e $1,61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em GR1 e GR2, respectivamente. Esses valores de Mg^{2+} nas microbacias florestadas (GR1 e GR2) são bem próximos do fluxo de Mg^{2+} estimado em $1,70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ por Cunha, Oliveira e Victoria (1999) em uma microbacia florestada de primeira ordem na Amazônia central.

O sódio (Na^+) destacou-se como um dos íons mais abundantes nas águas fluviais avaliadas, sendo seu fluxo total nas microbacias do Marapanim igual a $230,19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Dentre essas microbacias, destaca-se M1 com fluxo anual de $45,20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e chega a ser duas vezes maior do que os fluxos de Na^+ nas bacias de referência ($26,64 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em MR1 e $24,17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em MR2). Na bacia de Marapanim o fluxo de sódio apresentou correlação inversa com pastagem ($r_s = -0,678$ e $p=0,000$), capoeira alta ($r_s = -0,462$ e $p=0,000$) e cultura agrícola ($r_s = -0,354$ e $p=0,000$), e correlação direta com floresta ($r_s = 0,697$ e $p=0,000$). Observou-se, como já comentado, maiores concentrações de Na^+ nas microbacias florestadas. Tais resultados sugerem que a conversão de floresta para pastagem provoca diminuição de Na^+ nas águas fluviais em microbacias de pequenos igarapés anteriormente ocupados por floresta natural, fato também apontado por Horbe et al. (2008).

O fluxo total de Na^+ nas microbacias do Guamá foi de $180,59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que os maiores fluxos ocorreram nos igarapés das microbacias G3, G4, G7 e G1, cujos valores foram respectivamente $34,74 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $33,83 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, $32,61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $30,12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto que em G2 e G5 foram $8,80$ e $6,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Nesses dois últimos, os valores são comparáveis aos encontrados nos igarapés das microbacias de referência, que foram de $8,57$ e $9,32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em GR1 e GR2 respectivamente. Esses níveis menores de fluxos de Na^+ são comparáveis ao fluxo de Na^+ estimado em $9,87 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para uma microbacia parcialmente desmatada na Amazônia Central (WILLIAMS et al., 1997).

O fluxo total de potássio (K^+) nas microbacias de Marapanim foi de $41,82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os maiores fluxos de K^+ ocorreram em M1, M6 e M4 e coincidiram com maiores concentrações também nas mesmas microbacias. O fluxo em M1, o maior de todos, foi de $10,24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e pode ser uma resposta a utilização, já comentada, de fertilizante nos sistemas agrícolas, o que pode ser determinante para fluxos de K^+ nessa microbacia. Na M6 onde o fluxo foi apenas um pouco menor do que em M1, pode haver importante contribuição da prática da derruba e queima em local próximo às margens do igarapé, adicionando potássio provindo das cinzas, pois segundo Redin et al. (2011), o processo de queima da vegetação promove a disponibilidade imediata de K no solo. Na M4, com fluxo de $8,38 \text{ kg K}^+ \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o terceiro em magnitude em Marapanim, deve-se atentar para o predomínio de pastagem em sua área e para a presença frequente de bovinos em suas águas fluviais, cujas fezes e urina são ricas neste nutriente (GERMER et al., 2009). Nas demais microbacias, os fluxos de K^+ estiveram na mesma faixa das microbacias de referências, as quais apresentaram

valores de 2,60 e 3,20 kg ha⁻¹ ano⁻¹ na MR1 e na MR2, respectivamente. Esses valores são bem próximos aos valores de encontrados por Williams et al. (1997) em uma microbacia florestada. O fluxo de potássio em Marapanim apresentou correlação direta com cultura agrícola ($r_s = 0,451$ e $\rho = 0,000$) e pastagem ($r_s = 0,329$ e $\rho = 0,000$), e correlação inversa com floresta ($r_s = -0,466$ e $\rho = 0,000$) e capoeira baixa ($r_s = -0,541$ e $\rho = 0,000$), e assim confirma-se a hipótese de que sistemas agropecuários promovem aumento dos fluxos deste soluto.

O fluxo total de K⁺ nas microbacias do Guamá foi de 40,14 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Os maiores fluxos foram observados na G3 e na G7, que juntas contribuíram com mais de 43% do fluxo total. Nas microbacias de referência os fluxos foram de 1,27 e 1,71 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em GR1 e GR2, respectivamente, o que representa apenas 7,52 % do total exportado. Fluxo de K⁺ similar (1,68 kg ha⁻¹ ano⁻¹) foram encontrados por Cunha et al. (1999), no deflúvio de uma microbacia em bom estado de conservação na Amazônia central. Por sua vez, Williams et al. (1997) reportaram aumento no fluxo de K⁺ de 0,46 para 4,82 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em razão de um desmatamento parcial em uma microbacia amazônica. No entanto, a análise de correlação entre potássio e as classes de uso da terra na bacia do Guamá não apresentou correlação significativa para nenhuma das classes.

No presente estudo o cloreto (Cl⁻) foi o íon mais abundante na bacia de Marapanim. Seu fluxo de massa totalizou em 406,04 kg Cl⁻ ha⁻¹ ano⁻¹, sendo que o maior fluxo ocorreu na M1 com 74,20 kg Cl⁻ ha⁻¹ ano⁻¹, seguido pela M6 com 63,08 kg Cl⁻ ha⁻¹ ano⁻¹, pela M2 com 63,01 kg ha⁻¹ ano⁻¹, e pela M3 com 54,08 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Nas demais microbacias com uso agropecuário os fluxos foram menores do que nas duas microbacias de referência, que apresentaram fluxos de 48,28 kg Cl⁻ ha⁻¹ ano⁻¹ e 48,04 kg Cl⁻ ha⁻¹ ano⁻¹ em MR1 e MR2, respectivamente. Na bacia de Marapanim, o fluxo de Cl⁻ apresentou correlação inversa com pastagem ($r_s = -0,437$ e $\rho = 0,000$), capoeira alta ($r_s = -0,661$ e $\rho = 0,000$), capoeira baixa ($r_s = -0,309$ e $\rho = 0,000$), cultura agrícola ($r_s = -0,412$ e $\rho = 0,000$) e solo exposto ($r_s = -0,484$ e $\rho = 0,000$). Por outro lado, o cloreto foi também correlacionado com floresta, mas apresentou correlação positiva ($r_s = 0,582$ e $\rho = 0,000$). Estas correlações sugerem que a conversão de florestas para implantação de atividades agropecuárias reduz o cloreto nas águas fluviais das microbacias, e que as florestas são importantes fontes desse soluto.

Nas microbacias da bacia do Guamá, o fluxo de Cl⁻ somou 268,46 kg ha⁻¹ ano⁻¹, sendo que G2 e G5, ambas com áreas significativas de pastagem, tiveram os fluxos anuais de 13,75 e 14,80 kg Cl⁻ ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, valores que estão dentro da faixa de fluxos de Cl⁻ estimado para as microbacias de referência. No entanto, as demais cinco microbacias com uso agropecuário tiveram fluxos anuais maiores do que os das microbacias de referência, as quais apresentaram fluxos de Cl⁻ de 10,88 e 14,98 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em GR1 e GR2, respectivamente. Os fluxos de cloreto nas microbacias de referência, assim como os de sódio, foram mais altos que nas demais microbacias e confirmam que as florestas contribuem de modo decisivo para as entradas desses solutos nas águas fluviais, com ênfase para o papel do throughfall, o qual contribui para aumentar os fluxos de nutrientes na chuva até o solo, como demonstra o estudo de Tobon et al. (2004) em quatro ecossistemas florestais na Amazônia. Em geral, a principal fonte desses dois solutos para as águas fluviais é a chuva, pois estes elementos estão presentes na atmosfera e são oriundos dos aerossóis marinhos

(WICKEL, 2004), sendo que a água da chuva é ainda enriquecida com esses solutos ao interagirem com dossel da floresta (GERMER et al., 2009; GERMER et al., 2007; ZIMMERMANN et al., 2008).

O fluxo total de sulfato (SO_4^{2-}) nas microbacias de Marapanim foi de 304,23 kg ha^{-1} ano $^{-1}$. Os maiores fluxos de SO_4^{2-} foram na M6 com 74,20 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ e na M7 com 63,01 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ (tabela 10). Nas microbacias de referência os fluxos foram de 54,08 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ na MR1 e 34,73 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ na MR2. As demais microbacias com uso agropecuário tiveram os fluxos de SO_4^{2-} abaixo dos valores das microbacias de referência. A análise de correlação para as microbacias de Marapanim mostrou uma correlação direta de fluxo de sulfato com o percentual de capoeira alta ($r_s = 0,604$ e $\rho=0,000$) e de capoeira baixa ($r_s = 0,513$ e $\rho=0,000$).

Nas microbacias da bacia do Guamá, o fluxo total de SO_4^{2-} foi de 331,79 kg ha^{-1} ano $^{-1}$. Os fluxos foram maiores na G2 com 63,08 kg ha^{-1} ano $^{-1}$, na G4 com 48,26 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ e na G5 com 48,04 kg ha^{-1} ano $^{-1}$, enquanto que na G1 foi de apenas 5,24 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ e na G7 de 13,75 kg ha^{-1} ano $^{-1}$. Por sua vez, nas microbacias de referência os fluxos de SO_4^{2-} foram 53,98 ha^{-1} ano $^{-1}$ em GR1 e 44,98 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ em GR2.

O fluxo total de nitrogênio na forma de nitrato (N-NO_3^-) nas microbacias de Marapanim somou 60,14 kg ha^{-1} ano $^{-1}$. Desse total, a M1 exportou 19,66 kg N-NO_3^- ha^{-1} ano $^{-1}$, a M6 exportou 8,35 kg N-NO_3^- ha^{-1} ano $^{-1}$ e a M3 exportou 7,38 kg N-NO_3^- ha^{-1} ano $^{-1}$. Os fluxos nessas microbacias foram influenciados pelas mais altas concentrações de N-NO_3^- em suas águas fluviais. Por outro lado, a M4 fortemente influenciada por pastagem, apresentou o segundo menor fluxo de N-NO_3^- com 1,18 kg ha^{-1} ano $^{-1}$. O baixo fluxo de nitrato em pastagem coincide com os resultados dos estudos de Figueiredo et al. (2010), Neill et al. (2001; 2006). Esta tendência de redução de nitrato em rios e igarapés devido ao desmatamento para formação de pastagens também foi constatada por Biggs et al. (2004). Nas águas fluviais das microbacias florestadas os fluxos de N-NO_3^- foram de 13,11 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ na MR1 e 5,82 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ na MR2. Nas bacias florestadas, os fluxos desse íon podem aumentar devido à biomassa vegetal das matas ripárias e seus processos de degradação e mineralização da matéria orgânica provenientes da floresta e consequente formação de nitrato de origem alóctone (ESTEVES, 1998). Por outro lado, as práticas em sistema agrícola próximo às margens do igarapé em M1 incluem irrigação e uso de fertilizantes contendo nitrogênio, o que parece ser determinante para o fluxo de massa desse elemento nas águas fluviais. Rezende (2002) afirma que o uso de fertilizantes em atividades agropecuárias é a principal fonte de nitrogênio antropogênico para os rios. Para a bacia de Marapanim a influência das lavouras agrícolas em M1 e M6 sobre os fluxos de N-NO_3^- , pode ser a razão da correlação entre o nitrato e a classe cultivo agrícola ($r_s = 0,326$ e $\rho=0,000$).

Nas microbacias do Guamá o fluxo total de N-NO_3^- foi de 10,89 kg ha^{-1} ano $^{-1}$, com destaque para G4 com fluxo de 3,25 kg N-NO_3^- ha^{-1} ano $^{-1}$ e para G7 com 2,91 kg N-NO_3^- ha^{-1} ano $^{-1}$. Por outro lado, em G5, onde predomina pastagem, o fluxo de N-NO_3^- foi de apenas 0,19 kg ha^{-1} ano $^{-1}$. Nas microbacias de referência os fluxos de N-NO_3^- foram de 1,01 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ em GR1 e 1,80 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ em GR2. Admite-se de empobrecimento de nitrato nos solos das bacias com pastagem, pois houve menores fluxos de N-NO_3^- nessas microbacias em relação às bacias florestadas, tanto no Guamá como em Marapanim. Vários estudos relatam perdas de nitrato quando há conversão de floresta para pastagem (BIGGS et al., 2004; FIGUEIREDO et al.,

2010; MARKEWITZ et al., 2004; NEILL et al., 2001; NEILL et al., 2006). Os baixos fluxos de nitrato em igarapés em áreas de pastagem refletiram-se em correlação inversa com esta classe de uso no Guamá ($r_s = -0,600$ e $\rho = 0,000$). Por outro lado, nas microbacias florestadas houve correlação direta ($r_s = 0,749$ e $\rho = 0,000$).

O fluxo total de fósforo na forma de fosfato ($P-PO_4^{3-}$) nas microbacias de Marapanim foi de $0,290 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que o maior fluxo ocorreu na M3 ($0,056 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Nas microbacias de referência os fluxos foram de $0,033 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na MR1 e $0,022 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na MR2. Observou-se em apenas quatro das microbacias de Marapanim com sistemas agropecuários maior fluxo de fosfato em relação às microbacias florestadas.

Nas microbacias avaliadas no Guamá, o fluxo total de $P-PO_4^{3-}$ foi $0,335 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O fluxo mais elevado foi observado na G7 com $0,167 \text{ kg P-PO}_4^{3-} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que nas microbacias de referência os fluxos foram bem menores: de $0,006 \text{ kg P-PO}_4^{3-} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na GR1 e de $0,013 \text{ kg P-PO}_4^{3-} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na GR2. Os fluxos nessas microbacias, tanto alteradas quanto florestadas, são comparáveis aos fluxos de $0,08 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,02 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ encontrados por Williams et al. (1997) em igarapé onde o maior fluxo ocorreu após a implantação em sua microbacia de plantio de mandioca com preparo de área por derruba e queima.

O fluxo total de nitrogênio na forma de amônio ($N-NH_4^+$) nas microbacias de Marapanim foi de $6,05 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que a microbacia de pastagem (M4) contribuiu com mais de 32% desse total ou $1,98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os fluxos somados das microbacias florestadas (MR1 e MR2) correspondeu a 15,37% do fluxo total. O maior fluxo de $N-NH_4^+$ na M4 deve-se principalmente a sua maior concentração nas águas fluviais e pode ser explicada pela entrada de gado no igarapé, promovendo por meio de seu excremento e urina o aporte desse nutriente (CAMPOS, 2010). Neill et al. (2001) também observaram em Rondônia maiores concentrações de amônio em igarapé que drena área de pastagem comparadas com as concentrações em igarapés em microbacias florestadas. Bonilla (2005) encontrou predomínio de nitrogênio na forma de nitrato em igarapés de floresta, enquanto que o íon amônio foi mais abundante em igarapé de pastagem, indicando desnitrificação dentro do canal fluvial em ambiente com baixas concentrações de oxigênio dissolvido.

O fluxo total de $N-NH_4^+$ ($2,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) nas microbacias avaliadas no Guamá foi menor do o fluxo total em Marapanim. O maior fluxo no Guamá ocorreu na microbacia G6 ($0,67 \text{ kg N-NH}_4^+ \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Nas demais microbacias com uso agrícola os fluxos de amônio foram na mesma faixa das microbacias de referência ($0,12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na GR1 e $0,29 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na GR2).

CONCLUSÕES

Por meio de estimativas dos fluxos de massa dos íons avaliados confirmou-se que as mudanças de uso da terra nas microbacias amazônicas estão alterando os fluxos hidrogeoquímicos, pois quando se compara os fluxos nas microbacias florestadas com os fluxos nas microbacias alteradas por diferentes sistemas agropecuários, observa-se variações significativas.

Os sistemas agropecuários com uso de fogo foram determinantes para o aumento dos fluxos de cálcio, magnésio e potássio nas águas fluviais das microbacias avaliadas. O igarapé com influência de pastagem e presença constante de gado em suas águas apresentou o maior fluxo de nitrogênio na forma de

amônio. A microbacia com influência de sistema de irrigação e uso de fertilizantes a base de nitrogênio promoveu maior fluxo de nitrogênio na forma de nitrato nas águas fluviais. Por outro lado, as microbacias florestadas apresentaram maiores fluxos de sódio, cloreto, sulfato e nitrogênio na forma de nitrato.

Dessa maneira evidenciou-se que as atividades agrícolas praticadas nas bacias estudadas devem respeitar os limites de preservação determinados pela legislação ambiental brasileira para garantir a sustentabilidade das atividades agropecuárias e garantir a qualidade da água para o seu uso múltiplo pela sociedade e para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

REFERÊNCIAS

- BIGGS, T. W.; DUNNE, T.; MARTINELLI, L. A.. Natural controls and human impacts on stream nutrient concentrations in a deforested region of the Brazilian Amazon basin. *Biogeochemistry*, v.68, n.2, p.227–257, 2004.
- BONILLA, A. L. C.. **Balço de nitrogênio em microbacias pareadas (floresta vs. pastagem) no Estado de Rondônia**. Dissertação (Mestrado em ecologia de agroecossistema) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- BRASIL. **Cuidando das águas**: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos. Brasília: ANA, 2011.
- CAMPOS, M. L. A. M.. **Introdução à biogeoquímica de ambientes aquáticos**. Campinas: Átomos, 2010.
- CORDEIRO, A. H. F. ; PACHÉCO, N. A. ; SANTIAGO, A. V.. Climatologia da precipitação no município de Igarapé-Açu/PA, período: 1995-2009. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16. **Anais**. Belém: SDMET, 2010.
- CUNHA, H. B.; OLIVEIRA, J. A. D.; VICTÓRIA, R. L.. Balço dos nutrientes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- em uma bacia de primeira ordem com vegetação natural na Amazônia Central. *Acta Amazônica*, v.29, n.1, p.33-44, 1999.
- ESTEVES, F. A.. **Fundamentos de limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- FAPESPA. Fundação Amazônia de Amparo a estudos e Pesquisas. **Estatística Municipal: Mãe do Rio**. Belém: Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação, 2016.
- FIGUEIREDO, R. O.; MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E. A.; SCHULER, A. E.; WATRIN, O. S.; SILVA, P. S.. Land-use effects on the chemical attributes of low-order streams in the eastern Amazon. *Journal of Geophysical Research*, v.115, p.01-14, 2010. DOI: <http://10.1029/2009JG001200>
- GERMER, S.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; GOUVEIA-NETO, S. C.; ELSENBEEER, H.. Seasonal and within-event dynamics of rainfall and throughfall chemistry in an open tropical rainforest in Rondônia, Brazil. *Biogeochemistry*, v.86, n.2, p.155–174, 2007.
- GERMER, S.; NEILL, C.; VETTER, T.; CHAVES, J.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEEER, H.. Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. *Journal of Hydrological*, v.364, p.349–363, 2009.
- GLOBAL WATER. **FP101-FP201 Global Flow Probe: User's Manual**. 2004.
- HORBE, A. M. C.; OLIVEIRA, L. G. S.. Química de Igarapés de água preta no Nordeste do Amazonas-Brasil. *Acta Amazônica*, v.38, n.4, p.753–760, 2008.
- KRUSCHE, A. V.; BALESTTER, M. V. R.; VICTORIA, R. L.; BERNARDES, M. C.; LEITE, N. K.; HANADA, L.; VICTORIA, D. C.; TOLEDO, A. M.; OMETTO, J. P.; MOREIRA, M. Z.; GOMES, B. M.; BOLSON, M. A.; GOUVEIA-NETO, S.; BONELLI, N.; DEGAN, L.; NEILL, C.; THOMAS, S.; AUFDENKAMPE, A. K.; RICHEY, J. E.. Efeitos das mudanças do uso da terra na biogeoquímica da Bacia do rio Ji-Paraná, Rondônia. *Acta Amazônica*, n.2, v.35, p.197–205, 2005.
- LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; NEITSCH, S. L.. **ArcView interface forSWAT2000: user's guide**. Texas Water Resources Institute Report TR-193. Texas: Temple, 2002.
- MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D.. Nutrients loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in Amazonia. *Ecological Applications*, v.14, n.4, p.177–199, 2004.
- MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E. A.; FIGUEIREDO, R. O.; VICTORIA, R. L.; KRUSCHE, A. V. Control of cation concentrations in stream waters by surface soil processes in an Amazonian watershed. *Nature*, v.410, p.802-805, 2001. DOI: <http://10.1038/35071052>

MARTINS, C. E.. **Práticas agrícolas relacionadas à calagem do solo**. Comunicado Técnico, n.47. Juiz de Fora: Embrapa, 2005.

MILLER-JUNIOR, G. T.. **Ciência Ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

NEILL, C.; DEEGAN, L. A.; THOMAS, S. M.; CERRI, C. C.. Deforestation for pastures alters nitrogen and phosphorus in small Amazonian streams. **Ecological Applications**, v.11, n.6, p.1817-1826, 2001. DOI: <http://10.1890/1051-0761>

NEILL, C.; DEEGAN, L. A.; THOMAS, S. M.; HAUPERT, C. L.; KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, V. M.; VICTORIA, R. L.. Deforestation alters the hydraulic and biogeochemical characteristics of small lowland Amazonian streams. **Hydrological Processes**, v.20, p.2563-2580, 2006.

REBELLO, F. K.; SANTOS, M. A. S.; HOMMA, A. K. O.. Modernização da agricultura nos municípios do Nordeste Paraense: determinantes e hierarquização no ano de 2006. **Revista de Economia e Agronegócios**, n.2, v.9, p.209-232, 2011.

REDIN, M.; SANTOS, G. F.; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L.. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.21, n.2, p.381-392, 2011.

REZENDE, A. V.. **Agricultura e qualidade da água: contaminação por nitrato**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002.

SALIMON, C. I.; VICTORIA, R. L.; BROWN, I. F.; STONE, T.; DAVIDSON, E. A.. Mudança de cobertura da terra e fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera na Amazônia Sul Oriental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. **Anais**. Belo Horizonte, 2003.

SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. A. C.; SILVA, A. P. M.; LUEDEMANN, G.. **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios**. Rio de Janeiro: IPEA, 2012.

SÃO PAULO. **Guia Nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

SARDINHA, A. S.. **Avaliação dos efeitos da mata ciliar sobre os fluxos hidrogeoquímicos em área de pastagem: caso das bacias hidrográficas dos igarapés do Sete e Pajeú-Paragominas/PA**. Dissertação (Mestrado em geologia e geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

TELES, D. D.; DOMINGUES, A. F.. Água na agricultura e pecuária. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G.. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3 ed. São Paulo: Escritoras, 2006. p.325-364.

TOBON, C.; SEVINK, J.; VERSTRATEN, J. M.. Solute fluxes in throughfall and stemflow in four forest ecosystems in northwest Amazonia. **Biogeochemistry**, v.70, n.70, p.1-25, 2004.

WATRIN, O. S.; GERHARD, P.; MACIEL, M. N. M.. Dinâmica de uso da terra e configuração da paisagem em antigas áreas de colonização de base familiar, no Nordeste do Estado do Pará. **Geografia**, Rio Claro, v.34, n.3, p.455-472, 2009.

WICKEL, B. A. J.. Water and nutrient dynamics of a humid tropical watershed in Eastern Amazonia. **Ecology and Development Series**, n.21, 2004.

WILLIAMS, M. R.; MELACK, J. M.. Solute export from forested and partially deforested catchments in the central Amazon. **Biogeochemistry**, v.38 n.1, p.67-102, 1997.

ZIMMERMANN, A.; GEMER, S.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEER, H.. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest. **Journal of Hydrology**, v.360, p.87-102, 2008.