



## COMPORTAMENTO DO MERCÚRIO E OUTROS ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS LATERÍTICOS DA PROVÍNCIA AURÍFERA DO TAPAJÓS

S.M.B. de Oliveira<sup>1</sup>, J.H. Larizzatti<sup>2</sup>, D.I.T. Fávaro<sup>3</sup>

1. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, CEP 05508-900, São Paulo, SP

2. Pós-graduando do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, SP

3. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Trav. R, 400, CEP 05508-900, São Paulo, SP

Recebido em 02/02; aprovado para publicação em 11/02

### ABSTRACT

*Lateritic soil profiles from two artisanal mining sites in Tapajós Province were analysed for iron, mercury and other trace elements. At Garimpo Fazenda Pison area, the lateritic profile consists from bottom to top of the following horizons: a saprolite, a transition zone, a ferruginous duricrust and a latosol. Hg concentrations range between 18-117 ppb in the saprolite, 77-123 ppb in the transition zone, 188-385 ppb in the ironcrust and 100-222 ppb in the latosol. At Garimpo Porquinho area, the weathering profile is formed by a saprolite horizon (11-44 ppb Hg) covered by a latosol (85-103 ppb Hg). A comparative analysis of Hg and the other trace elements behaviour, in both areas, shows that in the superficial horizons of the weathering profiles there are losses of As, Sb, V, Mo, Sc and gains of Hg. These gains could be explained by the contribution of external sources, probably through atmospheric deposition.*

### RESUMO

*Os diferentes horizontes de perfis de solo lateríticos provenientes de dois garimpos da Província Tapajós foram analisados para ferro, mercúrio e outros elementos-traço. No Garimpo Fazenda Pison, o perfil consiste, da base para o topo, dos seguintes horizontes: saprolito, zona de transição, couraça ferruginosa e latossolo. Os teores de Hg estão na faixa de 18-117 ppb no saprolito, 77-123 ppb na zona de transição, 188-385 ppb na couraça e 100-222 ppb no latossolo. No Garimpo Porquinho, o perfil compreende um horizonte de saprolito (11-44 ppb Hg) coberto por latossolo (85-103 ppb Hg). Para os dois garimpos, um estudo comparativo do comportamento do Hg em relação aos outros elementos analisados mostrou que, nos horizontes superficiais dos perfis, há perda de As, Sb, V, Mo e Sc e ganhos de Hg. Esses ganhos poderiam ser explicados pela contribuição de fontes externas aos perfis, através de deposição por via atmosférica.*

## INTRODUÇÃO

A contaminação dos ecossistemas amazônicos por Hg é um problema que vem sendo muito discutido, sobretudo na última década, por cientistas das mais variadas especialidades. Foram constatados elevados níveis de Hg em peixes, cabelos humanos, sedimentos e solos (Malm *et al.*, 1991; Lacerda *et al.*, 1991; Barbosa *et al.*, 1995; Boischio *et al.*, 1995; Lebel *et al.*, 1996; Hacon *et al.*, 1997a e 1997b; Bidone *et al.*, 1997a e 1997b; Santos *et al.*, 2000). A origem dessa contaminação é tema controverso. Alguns pesquisadores consideram-na essencialmente antropogênica, derivada da atividade de garimpeira, hoje declinante, mas que fez uso intensivo do amálgama na recuperação do ouro, sobretudo na década de 80 (Pfeiffer & Lacerda, 1988; Lacerda, 1995; Lacerda & Marins, 1997; Villas Boas, 1997; Lacerda & Salomons, 1998), e também, das emissões de Hg provenientes das minas de ouro e prata dos Andes, a partir da época colonial (Nriagu, 1990; Nriagu, 1993; Lacerda, 1997). O Hg emitido para a atmosfera teria sido transportado por milhares de quilômetros, contaminando toda a bacia amazônica (Hacon *et al.*, 1995).

Outros autores chamam a atenção para o fato de que os solos são reservatórios naturais de Hg (Mason *et al.*, 1994) e que sua degradação contribuiria para a contaminação dos ecossistemas amazônicos (Roulet & Lucotte, 1995; Roulet *et al.*, 1996; Fostier *et al.*, 1997; Roulet *et al.*, 1997; Roulet *et al.*, 1998; Zeidemann, 1998; Fadini & Jardim, 2001; Oliveira *et al.*, 2001). De fato, há muitas evidências de que a transformação de solos lateríticos em solos podzólicos, de ocorrência natural ou desencadeada pela atividade humana, desestabiliza os óxi-hidróxidos de ferro, aos quais o Hg está associado, disponibilizando-o para os ecossistemas.

No entanto, ainda não está bem estabelecido quanto do estoque de Hg encontrado nos solos da Amazônia é de origem natural (litogênico) e quanto é antropogênico. Roulet *et al.* (1997, 1998) consideram que o Hg é essencialmente litogênico, com base em dados que indicariam que, mesmo levando em conta as fontes atuais e pretéritas de contaminação por atividades mineiras, o Hg emitido não seria suficiente para explicar os elevados estoques encontrados nos solos. Por outro lado, cálculos de balanço geoquímico para perfis de solo laterítico, situados nas localidades de Serra do Navio e Tartarugalzinho, no estado do Amapá (Oliveira

*et al.*, 2001), sugeriram que os teores de Hg encontrados nos níveis mais superficiais do perfil não poderiam ser explicados sem que se considerasse um aporte externo de Hg. Esse aporte viria, provavelmente, por via atmosférica, tal como ocorre em solos e sedimentos de regiões remotas (Fitzgerald *et al.*, 1998).

No presente trabalho, essa questão é retomada através de um estudo geoquímico comparativo entre o comportamento do Hg e de outros elementos-traço, em perfis de alteração lateríticos. Tanto o Hg como os outros elementos considerados estariam fixados nos óxi-hidróxidos de ferro, constituintes dos solos que possuem grande capacidade de sorção de metais pesados (Forbes *et al.*, 1974; Kuhnel, 1987; McKenzie, 1980). A região escolhida foi a Província Aurífera do Tapajós, onde a exploração artesanal do ouro, com uso de amálgama, é conhecida há mais de 50 anos.

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E MORFOPEDOLÓGICAS DA REGIÃO ESTUDADA

Os sítios estudados – Garimpo Fazenda Pison e Garimpo Porquinho, ambos produzindo ouro por amalgamação até, pelo menos, o ano 2000 – situam-se à margem esquerda do rio Tapajós, a cerca de 400 km a sudeste de Manaus (Fig. 1). A região pertence à unidade morfoestrutural denominada “Planalto Rebaixado do Médio Amazonas”, aplainada pelo pediplano, datado do Pleistoceno (Ventura *et al.*, 1975). Suas cotas altimétricas variam de 20 a 200 m, com caimento na direção NW. A drenagem atual representa o re-entalhamento holocênico do Pediplano Pleistocênico. Este pode ser relacionado à superfície de aplainamento Velhas, definida para o Brasil Oriental, por King (1957), cuja origem está relacionada ao soerguimento do continente no final do Terciário, com conseqüente retomada da erosão.

O clima atual é tropical úmido, sem estação fria. A temperatura do mês menos quente está sempre acima de 18°C (Am de Köppen). A precipitação média anual fica em torno de 2.500 mm e a umidade relativa média anual ao redor de 85% (Vieira *et al.*, 1975).

A região está contida na província estrutural Tapajós (Almeida *et al.*, 1981). A Figura 1 mostra o mapa geológico regional simplificado da Folha Mamãe Ana/SB.21-V-D (CPRM, 1999), com a localização dos dois garimpos.

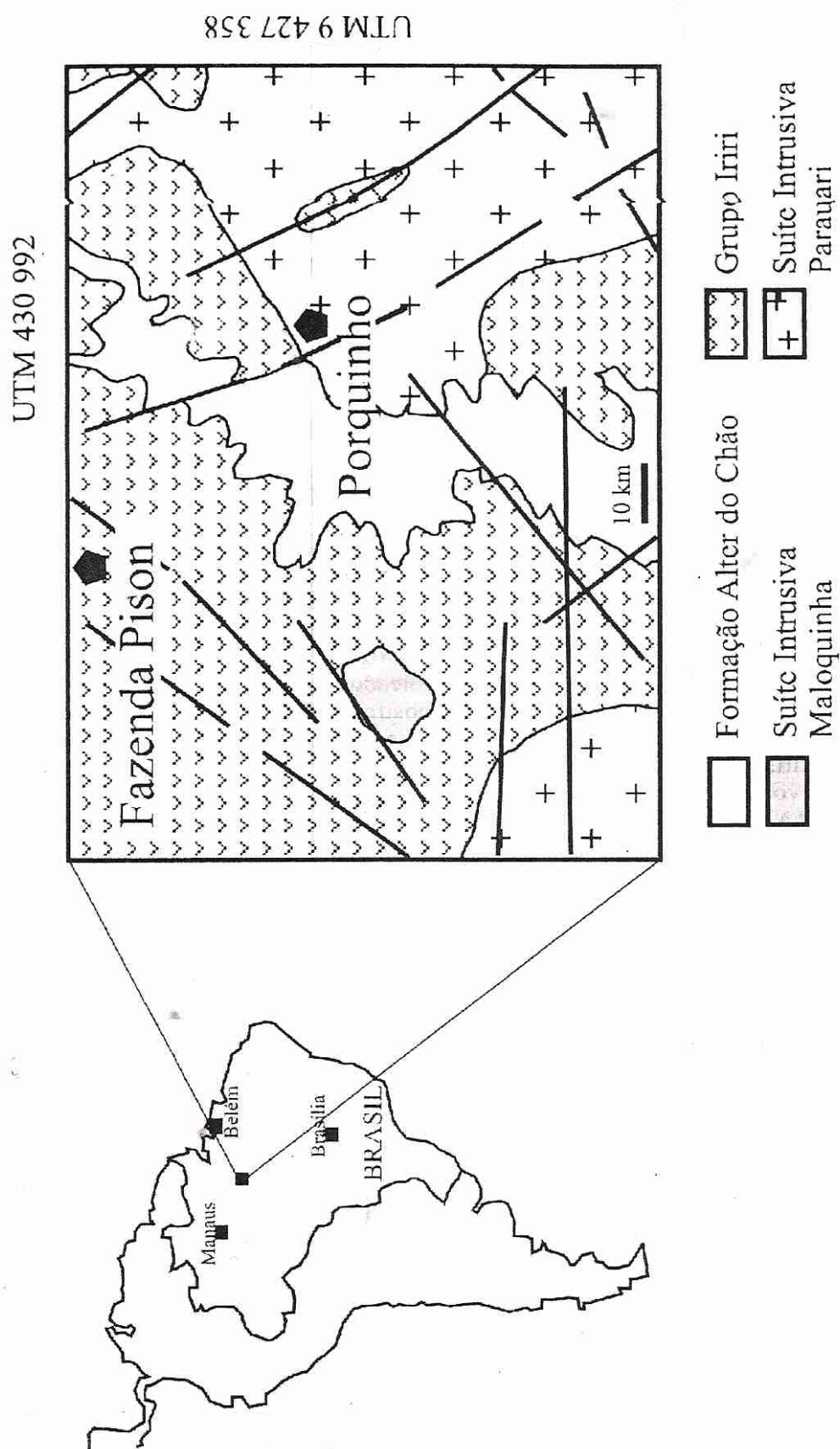


Figura 1 – Mapa geológico simplificado (fonte: CPRM, 1999) e de localização dos Garimpos Fazenda Pison e Porquinho.

No Garimpo Fazenda Pison, afloram rochas sub-vulcânicas ácidas intemperizadas do Grupo Iriri. A topografia da área é suavemente ondulada a altitudes entre 140 e 200 m. O padrão de drenagem é dendrítico e o principal curso d'água é o Igarapé Nambezinho. Na meia-encosta, aflora um perfil de alteração de cerca de 5 m de profundidade, constituído, da base para o topo, dos seguintes horizontes: saprolito de estrutura conservada (SAP), zona de transição com aspecto mosqueado (ZT), couraça ferruginosa (C), latossolo vermelho (LV) e latossolo amarelo (LA). Nas partes mais baixas das encostas, o latossolo vermelho pode estar ausente e, nesse caso, o latossolo amarelo repousa diretamente sobre a couraça. A estrutura e composição mineralógica do perfil de alteração estão apresentadas na Figura 2.

O Garimpo Porquinho (Larizzatti & Oliveira, 2002) situa-se em região de rochas graníticas da Suíte Intrusiva Paruari. O relevo é de colinas de topo aplainado a altitudes inferiores a 200 m. O perfil de alteração (Fig. 2), com aproximadamente 10 m de profundidade, compõe-se de 2 horizontes: saprolito (1-9 m) de estrutura conservada (SAP), recoberto por latossolo amarelo (LA), de composição próxima à do saprolito, sem estruturas visíveis (0-1 m).

O estudo do regolito na área do Garimpo Fazenda Pison (Larizzatti, 2002), indicou que este deriva de uma evolução intempérica policíclica, comparável à que ocorre nas porções mais a leste da borda sul do Craton Amazônico (Nahon *et al.*, 1989) e em regiões de floresta tropical úmida na África equatorial (Beauvais & Tardy, 1991; Bilong *et al.*, 1992; Biton & Volkoff, 1993; Beauvais & Colin, 1993). Segundo Tardy *et al.* (1991), a partir do final do Terciário, na faixa tropical do globo, em períodos de clima mais seco que o atual, formaram-se coberturas encoraçadas maciças, caracterizadas por intensa acumulação de ferro, sobretudo sob forma de hematita. Com mudança climática em direção à maior umidade, as couraças entraram em processo de degradação, de caráter deferruginizante e hidratante, em consequência da decomposição da matéria orgânica e da respiração radicular, que diminuem o Eh do meio, causando a remoção seletiva do ferro. O resultado desse processo são os latossolos, de composição argilo-ferruginosa, onde o ferro se encontra, sobretudo, como goethita.

A presença de um perfil laterítico completo, incluindo restos de couraça ferruginosa, como

aquele que ocorre no Garimpo Fazenda Pison, constitui uma exceção na Província Tapajós. Na maior parte da região, os testemunhos da evolução intempérica policíclica, acima mencionada, foram destruídos pela erosão, restando apenas perfis de alteração truncados no nível do saprolito, como acontece na área do Garimpo Porquinho.

## AMOSTRAGEM E TÉCNICAS ANALÍTICAS

No Garimpo Fazenda Pison, foram amostrados os diferentes horizontes de 3 perfis de alteração; sempre que possível, foram coletadas amostras do topo e da base de cada horizonte, perfazendo um total de 25. Na Tabela 1, estão indicados o tipo e a profundidade das amostras coletadas em cada perfil. No Garimpo Porquinho, foram coletadas 4 amostras do horizonte de solo a 1 m de profundidade, 4 amostras do saprolito a 3 m de profundidade, 1 amostra do saprolito a 7 m de profundidade e 1 amostra do saprolito a 10 m de profundidade. Com esse total de 10 amostras, foram construídos 4 perfis ideais, indicados na Tabela 2.

As amostras, de cerca de 2 kg cada, foram coletadas em trincheiras recém-expostas, homogeneizadas e secas ao ar, em local protegido. Foram, em seguida, quarteadas e moídas a menos 80 *mesh* e enviadas ao ACME Analytical Laboratories Ltd., em Vancouver, Canadá, para dosagem de Fe total, Hg, V, As, Sb, Mo e Sc por ICP/MS, após digestão por água régia. As 10 amostras do Garimpo Porquinho e metade das amostras do Garimpo Fazenda Pison foram re-analisadas para Hg por AA (geração de vapor frio), após ataque nítrico/sulfúrico. As diferenças de resultados entre as duas técnicas analíticas nunca superou 10%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados analíticos para os 3 perfis analisados no Garimpo Fazenda Pison. Do saprolito à couraça, ocorre intensa acumulação de Fe, que passa de teores em torno de 3% em peso para valores que chegam próximo de 30%. No latossolo, produto da degradação da couraça, há perda substancial de Fe, que atinge teores em torno de 4%, nos horizontes mais superficiais.

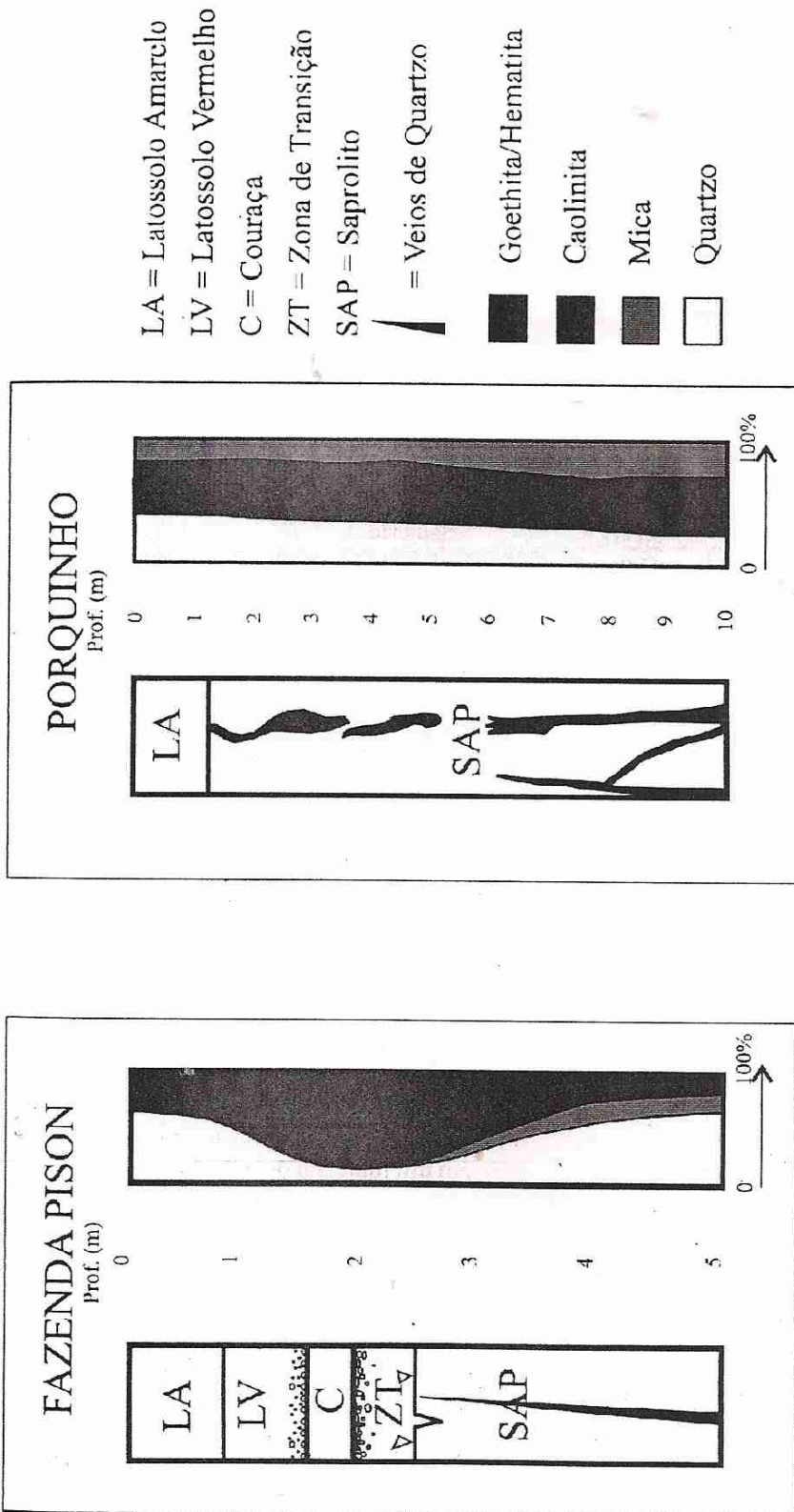


Figura 2 – Perfis de alteração do Garimpo Fazenda Pison e Porquinho.

**Tabela 1** – Amostragem dos perfis de alteração do Garimpo Fazenda Pison

Perfil	Material amostrado	Profundidade (m)	Amostra
1	Latossolo amarelo	0,5	LA1/1
	Latossolo amarelo	0,8	LA1/2
	Couraça	0,9	C1/1
	Couraça	1,2	C1/2
	Zona de transição	1,4	ZT1/1
	Zona de transição	1,8	ZT1/2
	Saprolito	2,3	SAP1/1
	Saprolito	2,6	SAP1/2
2	Latossolo amarelo	0,5	LA2/1
	Latossolo amarelo	1,3	LA2/2
	Latossolo vermelho	1,6	LV2/1
	Latossolo vermelho	2,5	LV2/2
	Couraça	2,7	C2/1
	Couraça	2,9	C2/2
	Zona de transição	3,0	ZT2/1
	Zona de transição	3,2	ZT2/2
3	Saprolito	4,5	SAP2/1
	Latossolo amarelo	0,5	LA3/1
	Latossolo amarelo	1,3	LA3/2
	Latossolo vermelho	1,7	LV3/1
	Latossolo vermelho	2,7	LV3/2
3	Couraça	2,8	C3/1

Hg, V, As, Sb e Mo acompanham, de modo geral, o comportamento do Fe. Esses elementos sofrem enriquecimento do saprolito para a zona de transição e, finalmente, para a couraça, onde atingem teores máximos. Com a formação dos latossolos, seus teores caem.

O Hg apresenta teores na faixa de 188 a 385 ppb, nos horizontes encouraçados, e na faixa de 137 a 221 ppb, no latossolo amarelo. Esses valores são da mesma ordem de grandeza daqueles apresentados em outras regiões da Amazônia, como o baixo vale do rio Tapajós (Roulet *et al.*, 1998), a região de Alta Floresta (Ribeiro *et al.*, 1999), a bacia do rio Madeira (Lechler *et al.*, 2000), a bacia do rio Negro (Fadini & Jardim, 2001) e a região de Serra do Navio (Oliveira *et al.*, 2001).

Para poder melhor comparar o comportamento do Hg e dos outros elementos que acom-

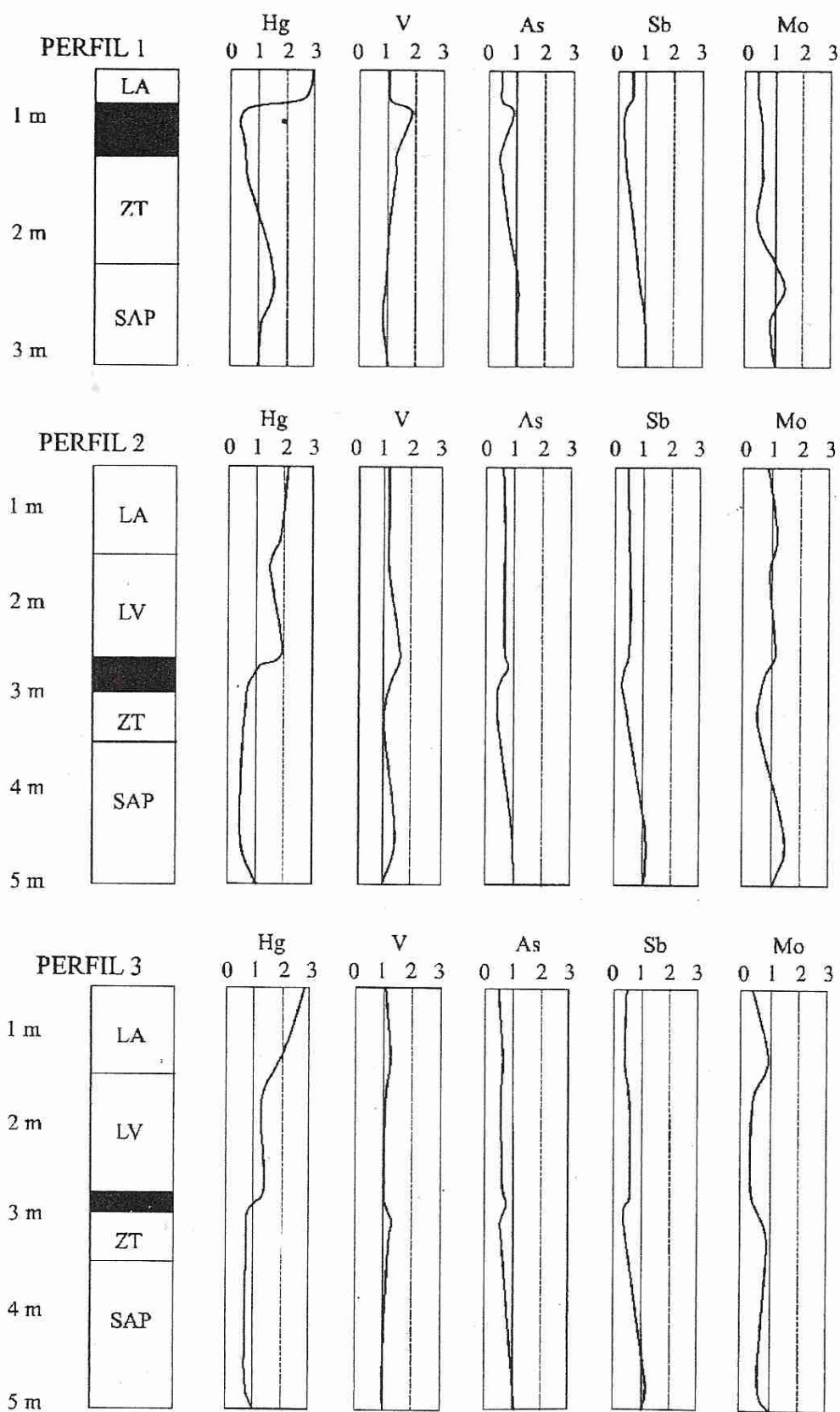
**Tabela 2** – Amostragem dos perfis de alteração do Garimpo Porquinho

Perfil	Material amostrado	Profundidade (m)	Amostra
1	Latossolo amarelo	1	LA1/1
	Saprolito	3	SAP1/2
	Saprolito	7	SAP/3
	Saprolito	10	SAP/4
2	Latossolo amarelo	1	LA2/1
	Saprolito	3	SAP2/2
	Saprolito	7	SAP/3
3	Saprolito	10	SAP/4
	Latossolo amarelo	1	LA3/1
	Saprolito	3	SAP3/2
3	Saprolito	7	SAP/3
	Saprolito	10	SAP/4
	4	Latossolo amarelo	1
Saprolito		3	SAP4/2
Saprolito		7	SAP/3
Saprolito		10	SAP/4

panham o Fe no perfil de alteração, foi calculado, para cada horizonte, o Fator de Enriquecimento (EF). EF é definido como a razão entre o teor do elemento X/teor de Fe no horizonte considerado e o teor do elemento X/teor de Fe em um material de referência, com o qual se deseja fazer a comparação. No caso estudado, foi considerado, material de referência, o saprolito médio, que representa o material parental dos demais horizontes do perfil de alteração. Num dado horizonte,  $EF > 1$  indica que o elemento considerado encontra-se mais enriquecido que o Fe em relação ao saprolito.  $EF < 1$ , ao contrário, implica em empobrecimento. Esse parâmetro vem sendo bastante utilizado no estudo de contaminação de sedimentos (Sinex & Wright, 1988; Ravichandran *et al.*, 1995) e equivale aos utilizados nos cálculos de balanços isoquímicos, comumente

**Tabela 3** – Teores de Fe (Fe total %), Hg(ppb), V, As, Sb e Mo (ppm) e valores de EF nos perfis de alteração da Fazenda Pison

	Fe	Hg	V	As	Sb	Mo	EF/Hg	EFV	EF/As	EF/Sb	EF/Mo
<b>Perfil 1</b>											
LA1/1	3,8	212	69	2,8	0,49	0,54	2,93	1,06	0,52	0,54	0,41
LA1/2	4,0	196	74	2,8	0,50	0,58	2,57	1,08	0,49	0,52	0,42
C1/1	29,2	286	926	37,2	1,68	5,48	0,51	1,85	0,89	0,24	0,55
C1/2	18,5	188	412	11,9	1,33	3,46	0,53	1,30	0,45	0,30	0,54
ZT1/1	10,7	122	236	8,0	0,90	2,15	0,60	1,29	0,52	0,35	0,58
ZT1/2	3,6	77	66	3,7	0,49	0,50	1,12	1,07	0,72	0,56	0,40
SAP1/1	3,1	92	49	4,7	0,58	1,52	1,56	0,92	1,06	0,78	1,33
SAP1/2	3,6	78	51	5,4	0,84	1,08	1,14	0,83	1,05	0,97	0,87
<b>Perfil 2</b>											
LA2/1	3,9	158	81	3,3	0,41	1,17	2,13	1,21	0,59	0,44	0,87
LA2/2	3,9	137	81	3,8	0,46	1,57	1,84	1,21	0,68	0,49	1,17
LV2/1	4,1	117	86	3,9	0,53	1,24	1,50	1,23	0,67	0,54	0,88
LV2/2	6,1	222	175	6,0	0,73	2,28	1,91	1,68	0,69	0,50	1,09
C2/1	18,0	385	487	20,5	1,38	5,11	1,12	1,58	0,80	0,32	0,83
C2/2	19,7	248	425	10,6	0,88	4,01	0,66	1,26	0,38	0,19	0,59
ZT2/1	6,3	123	168	5,6	0,71	1,77	1,02	1,56	0,62	0,47	0,82
ZT2/2	10,4	117	193	6,2	1,14	1,71	0,59	1,08	0,42	0,45	0,48
SAP2/1	2,1	18	55	2,9	0,55	1,02	0,45	1,53	0,97	1,09	1,41
<b>Perfil 3</b>											
LA3/1	4,2	221	76	3,1	0,50	0,54	2,76	1,06	0,52	0,49	0,37
LA3/2	4,0	155	84	3,7	0,40	1,25	2,03	1,23	0,65	0,41	0,91
LV3/1	4,1	100	75	3,4	0,56	0,53	1,28	1,07	0,58	0,57	0,38
LV3/2	4,4	115	77	4,0	0,62	0,51	1,37	1,02	0,64	0,58	0,34
C3/1	25,4	323	452	28,0	2,25	6,27	0,67	1,04	0,77	0,37	0,72
ZT3/1	7,6	107	170	5,7	0,68	1,78	0,74	1,31	0,52	0,37	0,68
ZT3/2	7,6	108	154	6,1	0,85	2,32	0,75	1,18	0,56	0,46	0,89
SAP3/1	4,0	56	64	5,3	1,09	0,79	0,73	0,94	0,93	1,13	0,57
Sap.médio	3,2	61	55	4,6	0,77	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



**Figura 3** – Evolução dos Fatores de Enriquecimento (EF) ao longo dos perfis de alteração do Garimpo Fazenda Pison.



realizados para perfis de alteração (Letkeman *et al.*, 1996; Oliveira *et al.*, 2001).

Na Tabela 3, estão também mostrados os valores de EF para os 5 elementos considerados nos 3 perfis estudados. A Figura 3 é uma ilustração gráfica da variação de EF com a profundidade. Hg, V, As, Sb e Mo mostram tendência de empobrecimento, ou mantêm-se mais ou menos constantes em relação ao Fe, do saprolito à couraça (valores de EF próximos de 1 ou menores que 1). A partir da couraça em direção aos latossolos, o quadro muda. Enquanto V, As, Sb e Mo apresentam queda nos valores de EF, para o Hg, os valores crescem significativamente, atingindo valores próximos de 3, na superfície. Isso significa que, com a exportação de Fe do perfil, durante a degradação da couraça, V, As, Sb e Mo são também exportados. O Hg, ao contrário, mostra enriquecimento.

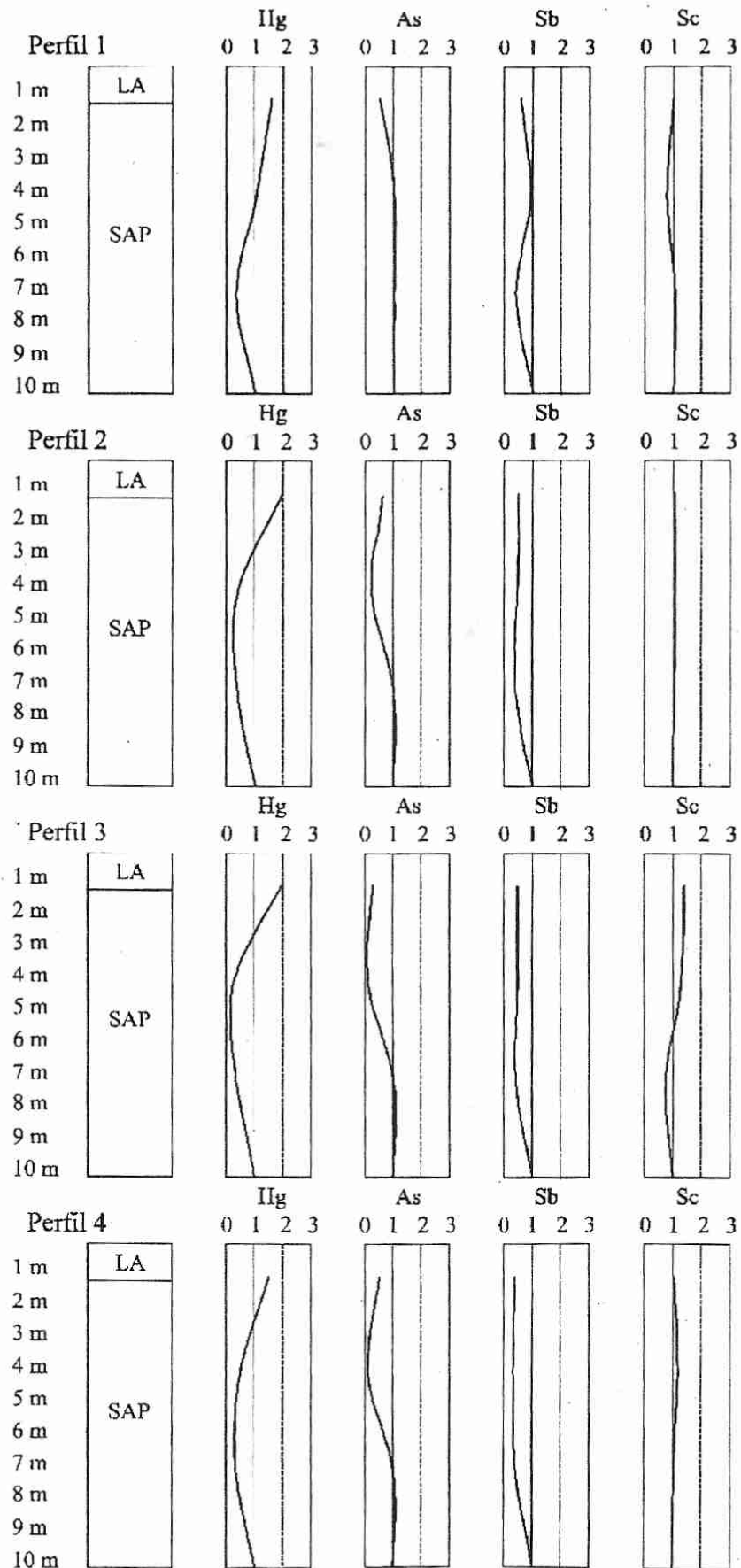
Esse comportamento do Hg, em contraste com os demais elementos analisados, poderia ser interpretado de duas formas: (1) A acumu-

lação de Hg é apenas relativa, isto é, esse elemento foi menos exportado do perfil que o Fe durante a degradação da couraça. Essa hipótese é dificilmente aceitável, pois pressuporia que o Hg, exportado do perfil mais intensamente que o Fe, quando da formação da couraça (EF geralmente em torno de 0,5 na couraça), invertesse seu comportamento, quando da degradação da couraça, e passasse a ser muito menos exportado que o Fe; (2) A acumulação de Hg nos níveis superficiais do solo é uma acumulação absoluta. Nesse caso, o Hg excedente em relação ao Fe teria origem externa ao perfil.

No manto de alteração do Garimpo Porquinho, o comportamento do Fe nos 4 perfis ideais mostra apenas um discreto aumento de concentração dos níveis inferiores do saprolito para o solo. As, Sb e Sc seguem, aproximadamente, esse comportamento. O Hg passa de teores na faixa de 10 a 30 ppb, no saprolito, a teores de 85 a 103 ppb, no solo (Tabela 4).

**Tabela 4** – Teores de Fe (Fe total %), Hg(ppb), As, Sb e Sc (ppm) e valores de EF nos perfis de alteração do Porquinho.

	Fe	Hg	As	Sb	Sc	EF/Hg	EF/As	EF/Sb	EF/Sc
Perfil 1									
LA1/1	5,98	84,7	34	2,0	17	1,61	0,51	0,57	1,02
SAP1/2	4,74	44,1	55	2,6	10	1,05	1,04	0,93	0,76
SAP/3	3,75	11,4	43	0,9	11	0,34	1,03	0,41	1,05
SAP/4	3,23	28,5	36	1,9	9	1,00	1,00	1,00	1,00
Perfil 2									
LA2/1	5,32	92,2	37	1,9	15	1,96	0,62	0,61	1,01
SAP2/2	3,96	12,9	9	1,2	12	0,37	0,19	0,51	1,09
SAP/3	3,75	11,4	43	0,9	11	0,34	1,03	0,41	1,05
SAP/4	3,23	28,5	36	1,9	9	1,00	1,00	1,00	1,00
Perfil 3									
LA3/1	5,28	88,7	16	1,5	18	1,90	0,27	0,48	1,22
SAP3/2	3,15	7,5	4	0,9	12	0,27	0,11	0,48	1,37
SAP/3	3,75	11,4	43	0,9	11	0,34	1,03	0,41	1,05
SAP/4	3,23	28,5	36	1,9	9	1,00	1,00	1,00	1,00
Perfil 4									
LA4/1	7,49	102,8	47	1,8	22	1,56	0,56	0,41	1,05
SAP4/2	3,76	17,4	6	0,7	13	0,52	0,14	0,32	1,24
SAP/3	3,75	11,4	43	0,9	11	0,34	1,03	0,41	1,05
SAP/4	3,23	28,5	36	1,9	9	1,00	1,00	1,00	1,00



**Figura 4** – Evolução dos Fatores de Enriquecimento (EF) ao longo dos perfis de alteração do Garimpo Porquinho.

Os valores de EF, calculados tomando como material de referência o saprolito coletado a 10 m de profundidade (SAP-4), estão igualmente dispostos na Tabela 4 e representados graficamente na Figura 4. Os EF são inferiores a 1 ou próximos de 1 para todos os elementos no saprolito amostrado a 7 e a 4 m de profundidade. No solo, As, Sb e Sc mantêm esse comportamento, enquanto o Hg mostra valores de EF sempre superiores a 1,5 (Fig. 4). Analogamente ao que acontece nos níveis superficiais de solo do Garimpo Fazenda Pison, também nesse caso, o excesso de Hg deve ser atribuído a fontes externas.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo comparado do Hg com alguns dos elementos que acompanham o Fe na formação de perfis lateríticos no Garimpo Fazenda Pison mostrou que, durante a formação da couraça ferruginosa, todos esses elementos mantêm-se mais ou menos conservados ou sofrem perdas moderadas em relação ao Fe. Nos latossolos, no entanto, o Hg apresenta um comportamento muito particular, qual seja, o de encontrar-se excepcionalmente enriquecido, enquanto os outros elementos investigados mantêm-se aproximadamente constantes ou sofrem perdas em relação ao Fe.

Mesmo em solos mais recentes, desenvolvidos diretamente sobre o saprolito, como é o caso daqueles encontrados no Garimpo Porquinho, o enriquecimento em Fe nos níveis superficiais é acompanhado de um enriquecimento maior

em Hg e de um empobrecimento ou manutenção dos outros elementos.

Assim, diferentemente dos outros elementos, cujo estoque nos solos pode ser atribuído tão somente à pedogênese laterítica, o Hg dos solos, nos casos estudados, proviria, além da parcela devida à pedogênese, de uma outra parcela cuja fonte seria externa ao perfil. A origem desse aporte externo pode estar relacionada às emissões provenientes das minas de Au e Ag, exploradas na América do Sul desde os tempos coloniais, e ao Hg, emitido nos últimos 30 anos pela atividade garimpeira. Essas emissões tiveram influência em escala regional, atingindo toda a bacia amazônica. Uma importante evidência nesse sentido provém da análise de sedimentos de lagos, em regiões remotas da Amazônia, que mostram que as taxas de deposição de Hg, desde o final do século 16 até os dias atuais, é várias vezes superior ao *background* pré-histórico (Lacerda *et al.*, 1999). Todo esse Hg, essencialmente antropogênico, poderia vir sendo incorporado aos solos, onde seria somado à parcela de Hg litogênico já existente. Esta seria uma explicação plausível para os valores anormalmente elevados de EF para o Hg encontrados nos solos superficiais aqui estudados, quando comparados aos de outros elementos que acompanham o Fe na pedogênese laterítica.

### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP (Proc. 1999/1537-9), que viabilizou a realização deste trabalho.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M DE; HASUI, Y.; NEVES, B.B. DE B.; FUCK, R.A.A. (1981) Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.*, **17**:1-29.
- BARBOSA, A.C.; BOISCHIO, A.A.; EAST, G.A.; FERRARI, I.; GONÇALVES, A.; SILVA, P.R.M.; CRUZ, T.M.E. DA (1995) Mercury contamination in the Brazilian Amazon. Environmental and occupational aspects. *Water, Air and Soil Pollut.*, **80**:109-121.
- BIDONE, E.D.; CASTILHOS, Z.C.; SOUZA, T.M.C. DE; LACERDA, L.D. (1997a) Fish contamination and human exposure to mercury in the Tapajós river basin, Pará State, Amazon, Brazil: A screening approach. *Bull. Envir. Contam. Toxicol.*, **59**:194-201.
- BIDONE, E.D.; CASTILHOS, Z.C.; SANTOS, T.J.S.; SOUZA, T.M.C. DE; LACERDA, L.D. (1997b) Fish contamination and human exposure to mercury in Tartarugalzinho river, Amapá State, Northern Amazon, Brazil: A screening approach. *Water, Air and Soil Pollut.*, **97**:9-15.
- BEAUVAIS, A. & TARDY, Y. (1991) Formation et dégradation des cuirasses ferrugineuses sous climat tropical humide, à la lisière de la forêt équatoriale. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **309**(2):553-560.

- BEAUVAIS, A. & COLIN, F. (1993) Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chem. Geol.*, **106**:77-101.
- BILONG, P.; BELINGA, S.E.; VOLKOFF, B. (1992) Séquence d'évolution des paysages cuirassés et des sols ferrallitiques en zones forestières tropicales d'Afrique Centrale. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **314**(2):109-115.
- BITON, D. & VOLKOFF, B. (1993) Altération déferruginisante des cuirasses massives et formation des horizons gravillonaires ferrugineux dans les sols de l'Afrique Centrale humide. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **316**(2):1447-1454.
- BOISCHIO, A.A.P.; HENSHEL, D.; BARBOSA, A.C. (1995) Mercury exposure through fish consumption by the upper Madeira river population, Brazil 1991. *Ecosys. Health*, **1**:177-192.
- CPRM (1999) Geologia e Recursos Minerais da Folha Mamãe Anã (SB. 21-V-D). Nota explicativa. Programa Levantamentos Geológicos Básicos. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós/Manaus. Relatório técnico.
- FADINI, P.S. & JARDIM, W.F. (2001) Is the rio Negro Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury? *The Sci. Tot. Environ.*, **275**:71-82.
- FITZGERALD, W.F.; ENGSTROM, D.R.; MASON, R.P.; NATER, E.A. (1998) The case for atmospheric mercury contamination in remote areas. *Environ. Sci. Technol.*, **32**:1-7.
- FORBES, E.A.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. (1974) The specific adsorption of inorganic Hg (II) species and Co (III) complex ions on goethite. *J. Colloid Interface Science*, **49**:403-409.
- FOSTIER, A.H.; FORTI, M.C.; GUIMARÃES, J.R.; BOULET, R.; OLIVEIRA, S.M.B. DE; MELFI, A.J. (1997) Mass balance of mercury in a natural forested Amazonian watershed. BIOGEOMON'97, Villanova University, USA, *J. Conf. Abstracts*, **2**(2):176p.
- HACON, S.; ARTAXO, P.; GERAB, F.; YAMASOE, M.A.; CAMPOS, R.C.; CONTI, L.F.; LACERDA, L.D. DE (1995) Atmospheric mercury and trace elements in the region of Alta Floresta in the Amazon Basin. *Water, Air and Soil Pollut.*, **80**:273-283.
- HACON, S.; ROCHEDO, E.R.; CAMPOS, G.; LACERDA, L.D. (1997a) Mercury exposure through fish consumption in the urban area of Alta Floresta in the Amazon Basin. *J. Geoch. Expl.*, **58**:209-216.
- HACON, S.; ROCHEDO, E.R.; CAMPOS, R.; ROSALES, G.; LACERDA, L.D. (1997b) Risk assessment of mercury in Alta Floresta, Amazon Basin, Brazil. *Water, Air and Soil Pollut.*, **97**:91-105.
- KING, L.C. (1957) A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geograf.*, **2**:3-265.
- KUHNEL, R.A. (1987) The role of cationic and anionic scavengers in laterites. *Chem. Geol.*, **60**:31-40.
- LACERDA, L.D. (1995) Amazon mercury emissions. *Nature*, **374**:20-21.
- LACERDA, L.D. (1997) Global mercury emissions from gold and silver mining. *Water, Air and Soil Pollut.*, **97**:209-221.
- LACERDA, L.D. & MARINS, R.V. (1997) Anthropogenic mercury emissions to the atmosphere in Brazil: The impact of gold mining. *J. Geoch. Expl.*, **58**:223-229.
- LACERDA, L.D. & SALOMONS, W. (1998) Mercury from gold and silver mining: a chemical time bomb? Springer-Verlag, Berlin, 146p.
- LACERDA, L.D. DE; SALOMONS, W.; PFEIFFER, W.C.; BASTOS, W.R. (1991) Mercury distribution in sediment profiles from lakes of the high Pantanal, Mato Grosso State, Brazil. *Biogeochem.*, **14**:91-97.
- LACERDA, L.D.; RIBEIRO, M.G.; CORDEIRO, R.C.; SIFEDDINE, A.; TURCQ, B. (1999) Atmospheric mercury deposition over Brazil during the past 30,000 years. *Ciênc. Cult. J. Braz. Assoc. Advanc. Sci.*, **51**(5/6):363-371.
- LARIZZA HI, J.H. (2002). Ouro e elementos indicadores no regolito do Garimpo Fazenda Pison. Processos de dispersão e implicações para prospecção. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 204p.
- LARIZZATTI, J.H. & OLIVEIRA, S.M.B. DE (2002) Some observations on gold in the weathering mantle at Garimpo Porquinho, an artisanal mine in the Tapajós region, Brazilian Amazon. *J. Geochem. Expl.* (submetido).

- LEBEL, J.; MERGLER, D.; LUCOTTE, M.; AMORIM, M.; DOLBEC, J.; MIRANDA, D.; ARANTES, G.; RHEAULT, I.; PICHET, P. (1996) Evidence of early nervous system dysfunction in Amazonian populations exposed to low-levels of methylmercury. *Neurotoxic.*, **17**(1):157-168.
- LECHLER, P. J.; MILLER, J.R.; LACERDA, L.D.; VINSON, D.; BONZONGO, J.C.; LYONS, W.B.; WARWICK, J.J. (2000) Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments?. *The Sci. Total Environ.*, **260**:87-96.
- LETKEMAN, L.P.; TIESSEN, H.; CAMPBELL, C.A. (1996) Phosphorus transformations and redistribution during pedogenesis of western Canadian soils. *Geoderma*, **71**:201-218.
- McKENZIE, R.M. (1980) The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. *Austr. J. Soil Res.*, **18**:61-73.
- MALM, O.; PFFEIFER, W.C.; SOUZA, C.M.M. (1991) Main pathways of mercury in the Madeira River, Brazil. *In: Heavy Met. Environ. Int. Conf.*, 8<sup>th</sup>, Edinburgh. Abstracts, **1**:515-518.
- MASON, R.P.; FITZGERALD, W.F.; MOREL, F.F.M. (1994) The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **58**(15):3191-3198.
- NAHON, D.; MELFI, A.J.; CONTE, C.N. (1989) Présence d'un vieux système de cuirasses ferrugineuses latéritiques en Amazonie du Sud. Sa transformation *in situ* en latosols sous forêt équatoriale actuelle. *C.R. Acad. Sci. Paris*, **308**:755-760
- NRIAGU, J.O. (1990) Global metal pollution poisoning the biosphere? *Environ.*, **32**(7):7-33.
- NRIAGU, J.O. (1993) Legacy of mercury pollution. *Nature*, **363**:589.
- OLIVEIRA, S.M.B. DE; MELFI, A.J.; FOSTIER, A.H.; FORTI, M.C.; FÁVARO, D.I.; BOULET, R. (2001) Soils as an important sink for mercury in the Amazon. *Water, Air, and Soil Pollut.*, **26**:321-337.
- PFFEIFER, W.C. & LACERDA, L.D. (1988) Mercury inputs into the Amazon region, Brazil. *Environ. Tech. Letters*, **9**:325-330.
- RAVICHANDRAN, M.; BASKARAN, M.; SANTISCHI, P.H.; BIANCHI, T.S. (1995) History of trace metal pollution in Sabine–Neches Estuary, Beaumont, Texas. *Environm. Sci. Techn.*, **29**:1495-1503.
- RIBEIRO JR., M.G.; SILVA FILHO, E.V.; SOUZA, M.; LACERDA, L.D. (1999) Mercury burden in soils from Central Amazon. Mercury as a Global Pollutant. *In: Int. Conf.*, 5<sup>th</sup>, Rio de Janeiro. Abstracts, p.558.
- ROULET, L. & LUCOTTE, M. (1995) Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferralitic soils of a tropical rain forest in French Guyana, South America. *Water, Air and Soil Pollut.*, **80**:1079-1088.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; RHEAULT, I.; TRAN, S.; FARELLA, N.; CANUEL, R.; MERGLER, D.; AMORIM, M. (1996) Mercury in Amazonian soils: accumulation and release. *In: Fourth Int. Symp. Geoch. Earth's Surface*, 4<sup>th</sup>, Ilkley, England. Proc., p.453-457.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; FARELLA, N.; SERIQUE, G.; COELHO, H.; SOUSA PASSOS, C.J.; SILVA, E.J.; ANDRADE, P.S.; MERGLER, D.; AMORIM, M. (1997) Effects of recent human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems. *Water, Air and Soil Pollut.*, **112**:297-313.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; SAINT-AUBIN, A.; TRAN, S.; RHEAULT, I.; FARELLA, N.; SILVA, E. DE J. DA; DEZENCOURT, J.; PASSOS, C.J.S.; SOARES, G.S.; GUIMARÃES, J.R.; MERGLER, D.; AMORIM, M. (1998) The geochemistry of mercury in central Amazonian soils developed on the Alter-do-Chão Formation of the lower Tapajós River Valley, Pará state, Brazil. *Sci. Tot. Environ.*, **223**:1-24.
- SANTOS, L.S.N.; MÜLLER, R.C.S.; SARKIS, J.E.S.; ALVES, C.N.; BRABO, E.S.; SANTOS, E.O.; BENTES, M.H.S. (2000) Evaluation of total mercury concentrations in fish consumed in the municipality of Itaituba, Tapajós River basin, Pará, Brazil. *The Sci. Total Environ.* **261**:1-8.
- SINEX, S.A. & WRIGHT, D.A. (1988) Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay. *Mar. Pollut. Bull.*, **19**(9):425-431.

- TARDY, Y.; KOBILSEK, B.; PAQUET, H. (1991) Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical palaeoclimates during the past 150 m.y. and implications for India and Australia. *J. Afr. Earth Sci.*, **12**:283-295.
- VENTURA, L.M.; ÁVILA, L.M.; BARBOSA, G.V. (1975) Geomorfologia. *In*: Levantamento de Recursos Minerais, volume 7, Folha SB.21 Tapajós, Projeto Radam, MME, DNPM, Rio de Janeiro.
- VIEIRA, L.S.; ARAÚJO, J.V.; FAUSTINO NETO, M.; PERES, R.N. (1975) Levantamento Exploratório de Solos. *In*: Levantamento de Recursos Minerais, volume 7, Folha SB.21-Tapajós, Projeto Radam, MME, DNPM, Rio de Janeiro.
- VILLAS BOAS, R.C. (1997) The mercury problem in the Amazon due to gold extraction. *J. Geoch. Expl.*, **58**:217-222.
- ZEIDEMANN, V.K. (1998) A geoquímica de mercúrio em solos da bacia do rio Negro e sua influência no ciclo regional do mercúrio. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas/ Universidade do Amazonas, 75p.