



MERCÚRIO EM SOLOS DA SUB-BACIA DO RIO CORUMBIARA(RO): ANÁLISE DO PADRÃO ESPACIAL DA DISPERSÃO

^{1*}J. C. Herrmann, ^{2**}G. C. Ferreira, ^{3***}W. R. Bastos, ^{2****}J. R. Sturaro

¹Instituto de Criminalística de Rondônia, R. Flores da Cunha, 4.370 –
Costa e Silva, CEP 76.803-594, Porto Velho, RO, Brasil

²Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP,
Av. 24 A, 1515 – Bela Vista, CEP 13.506-900, Rio Claro, SP, Brasil

³Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR,
Rodovia BR 364, km 9,5, CEP 76.801-000, Porto Velho, RO, Brasil

E-mail: *jcherrmann@ig.com.br; **Gilda@rc.unesp.br; ***bastoswr@unir.br; ****sturaro@rc.unesp.br

Recebido em: 02/09, aprovado para publicação em 07/09

ABSTRACT

This study analysed and identified the dispersal pattern of total mercury in soils from the Corumbiara River sub-basin, Rondônia. Samples were collected from depths of 0 to 10 cm and 10 to 30 cm. The results obtained indicate an average value of mercury in the sub-basin soils of 74.54 $\mu\text{g.kg}^{-1}$. The Arenosols present average concentrations of 112,61 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, followed by Oxisols with 100,92 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, Argisols with 88,60 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, Fluvisols with 63,09 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ and Gleysols with 32,96 $\mu\text{g.kg}^{-1}$. Analysis of the dispersion patterns identified that the highest concentrations of mercury are found in soils located in the upper sub-basin, which are dominated by erosive geomorphological units and under impact of human occupation. The average course and mouth of the Corumbiara River is located in the lower part of the sub-basin. This is dominated by geomorphological units of a depositional nature and with soils with lower concentrations of mercury. The high concentration of total mercury in sediments eroded and the relatively low concentrations in sediments in the deposition area can be explained by the nature of the wetland environment of deposition. This wetland environment promotes the methylation of mercury and the removal of these sediments.

RESUMO

Neste estudo foi estabelecido e analisado o padrão de dispersão do mercúrio total em solos da sub-bacia do Rio Corumbiara, estado de Rondônia, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 30 cm. Os resultados obtidos indicam um valor médio de mercúrio para os solos da sub-bacia de 74,54 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, sendo que os Neossolos Quartzarênicos apresentaram concentrações médias de 112,61 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, seguido pelos Latossolos com 100,92 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, Argissolos com 88,60 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, Neossolos Flúvicos com 63,09 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ e Gleissolos com 32,96 $\mu\text{g.kg}^{-1}$. A análise do padrão de dispersão mostrou que o Rio Corumbiara tem suas nascentes e a de seus principais tributários posicionadas na parte alta da sub-bacia, onde

se encontram os solos com as maiores concentrações relativas de mercúrio, em unidades geomorfológicas de natureza erosiva e sob impacto da ocupação antrópica. O médio curso e a foz se localizam na parte baixa da sub-bacia, dominada por unidade geomorfológica deposicional, com solos com as menores concentrações relativas de mercúrio. A elevada concentração relativa de mercúrio nos solos erodidos e as concentrações baixas nos solos da área de deposição, podem ser explicadas pela natureza pantanosa do ambiente que favorece a metilação e a remoção do mercúrio destes sedimentos.

INTRODUÇÃO

A presença de mercúrio na região Amazônica tem sido estudada desde a década de 80, ocasião em que se iniciou a grande corrida em busca de ouro na região. O mercúrio, utilizado como agente amalgamador do ouro no processo de garimpagem, sofreu grandes perdas para o ambiente, sendo a contaminação ambiental inicialmente diagnosticada creditada à atividade garimpeira. (Pfeiffer et al., 1989; Malm, 1991; Branches et al., 1993; Akagi et al., 1994; Malm et al., 1995; Lacerda, 1995; Malm, 1998). Estudos posteriores revelaram que locais sem qualquer atividade garimpeira apresentavam altos índices de contaminação em peixes e em populações ribeirinhas (Forsberg et al., 1995; Lebel, 1999), indicando que não deveria haver apenas uma fonte de mercúrio para a contaminação ambiental então diagnosticada.

Os pesquisadores voltaram-se então para os solos da região Amazônica, principalmente na região do Rio Tapajós e do Rio Negro (Roulet et al., 1996; Roulet et al., 1998; Roulet et al., 1999; Fadini e Jardim, 2001; Barbosa et al., 2003), concluindo que alguns solos se comportavam como depósitos naturais deste elemento. A ocupação antrópica, seguida de desmatamento das florestas, queima da biomassa e estabelecimento de agricultura e pecuária foi apontada como um agente mobilizador do mercúrio presente nos solos, disponibilizando esse elemento para o meio hídrico (Veiga et al., 1994; Meech et al., 1997; Roulet et al., 1999; Roulet et al., 2000a). No meio hídrico, o mercúrio sofre metilação por vários processos (Bayens et al., 1996; Bisinoti e

Jardim, 2004), vindo a se tornar um dos elementos mais tóxicos e de ampla disseminação no mundo, sendo encontrado desde as regiões mais povoadas, até as mais inóspitas como o Ártico e a Antártica (Pirrone e Mahaffey, 2005).

Os rios Amazônicos com suas grandes planícies de inundação e lagos, foram apontados como ambientes favoráveis à metilação do mercúrio (Meech et al., 1997; Guimarães et al., 1998; Roulet et al., 2000b; Guimarães et al., 2000; Roulet et al., 2001), com sua entrada na cadeia trófica, bioacumulação e biomagnificação, chegando finalmente ao homem.

Os estudos sobre a presença de mercúrio em solos na Amazônia, no entanto, como alertam Wasserman et al. (2001, 2003), ao analisarem o ciclo do mercúrio no ambiente amazônico e realizarem uma discussão sobre a origem da contaminação ambiental (natural ou antropogênica), são em sua maioria baseados em amostras cujos resultados são restritos, mas com conclusões estendidas para toda a região.

Buscando suprir esta lacuna, através do presente estudo, realizado em uma região com 9.795,94 km², onde ocorre uma ampla variedade de solos e de rochas, com alternância de ambientes preservados e de intensa ocupação antrópica, relevo elevado e extensas várzeas submetidas a inundação sazonal, foi estabelecido o padrão da dispersão do mercúrio total nos solos e discutido como este elemento se relaciona com os solos, com a geologia e com a geomorfologia, utilizando-se ferramentas de análise pouco exploradas até

o momento nos estudos sobre mercúrio, tais como sistema de informação geográfica, banco de dados e geoestatística.

Área de estudo

A área de estudo abrange os solos da sub-bacia do Rio Corumbiara, situada a

sudeste do estado de Rondônia, em um total de 9.795,94 km² (Figuras 1 e 2).

Apresenta como características singulares, a elevada diversidade de solos e de rochas e o relevo transicional desde o topo da Serra dos Parecis até as extensas áreas da planície de inundação do Rio Guaporé.

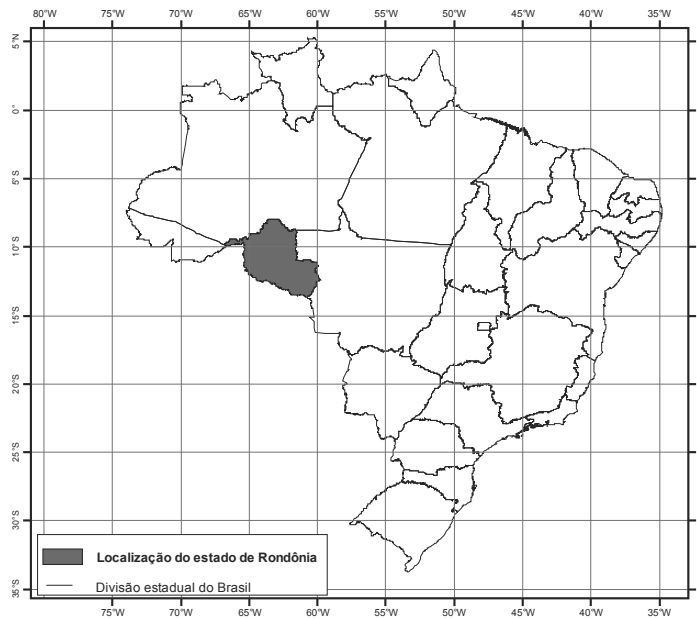


Figura 1: Localização do estado de Rondônia.

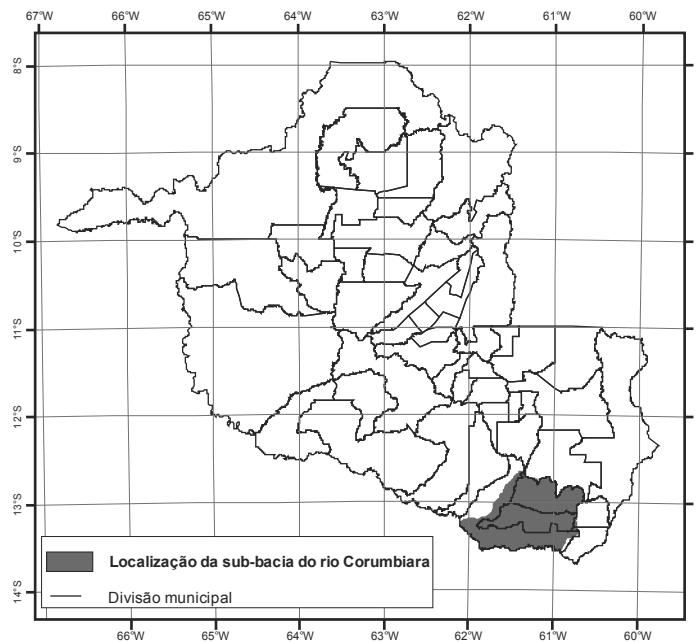


Figura 2: Localização da sub-bacia do Rio Corumbiara.

MATERIAIS E MÉTODOS

Metodologia de amostragem de campo

Por se tratar de um estudo sobre a presença de mercúrio total no solo, buscando estabelecer o padrão regional da dispersão deste elemento, optou-se por coletar duas amostras em cada ponto, nas profundidades de 0 a 10 cm, área presumivelmente mais afetada pelas intempéries e ação antrópica e de 10 a 30 cm, área presumivelmente mais preservada. Embora não haja uma metodologia específica para este tipo de amostragem no que se refere à profundidade a ser coletada, padrões semelhantes foram utilizados por Lacerda et al. (1999), Fostier et al. (2000), Roulet et al. (1998, 2001) e Miretzky et al. (2005).

A malha de amostragem foi estabelecida em função das rodovias existentes na área, cada ponto distando aproximadamente 5 km do outro (Figura 3), procurando-se imprimir a maior regularidade possível na distribuição das amostras, bem como abranger a maior diversidade de solos, de unidades geológicas e de geomorfológicas. As amostras situadas ao longo do Rio Corumbiara e Rio Guaporé foram obtidas com utilização de barco, uma vez que não havia acesso através de estradas. Foram realizadas três expedições de campo para coleta de amostras, nos períodos de 13 a 18/11/2004, 15 a 22/09/2005 e de 26 a 30/10/2007.

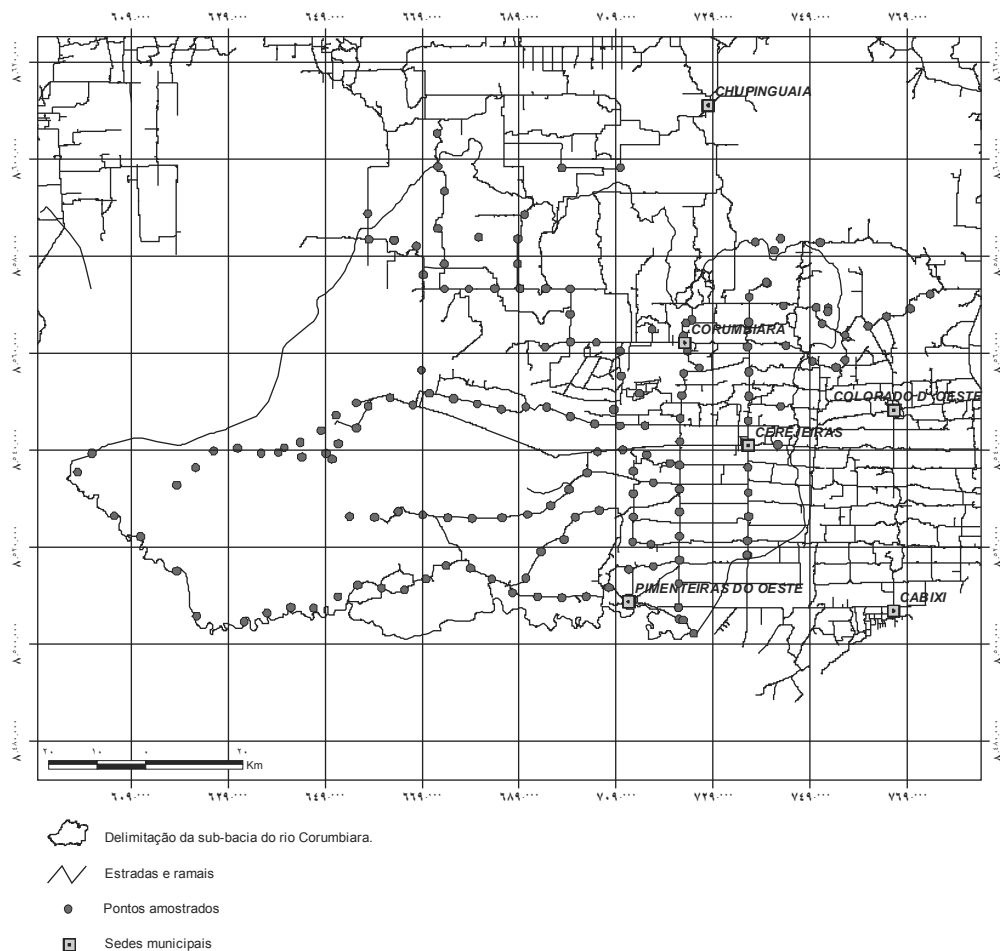


Figura 3: Mapa de localização dos pontos amostrados

Metodologia de análise química

As amostras foram inicialmente homogeneizadas à úmido nos próprios sacos plásticos utilizados em campo, através da aplicação de água ultra-pura (milli-q), sendo posteriormente peneiradas na fração 200 mesh (<74 µm), considerada a mais ativa fisicamente em processos de adsorção, por possuir maior área superficial (Bastos, 1997). A fração que passou na peneira foi transferida para um gral de porcelana e seca em estufa à temperatura de 50°. Após seca, foi macerada no próprio gral com utilização de pistilo de porcelana e armazenada em frascos plásticos rígidos.

Foram analisadas segundo metodologia proposta por Bastos et al. (1998) no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal de Rondônia, através da utilização de um espectrofotômetro de absorção atômica específico para determinação de mercúrio, marca Perkin Elmer, modelo FIMS-400 (Flow Injection Mercury System), com amostrador automático (AS-90) e micro-computador com programa próprio acoplado (Software Winlab-Perkin Elmer).

Metodologia de tratamento estatístico

Com os resultados obtidos em laboratório, assim como as observações de campo, foi elaborado um banco de dados, com análise através da estatística clássica e geoestatística, tendo como ferramentas de análise o semi-variograma e a krigagem indicativa. A krigagem indicativa foi utilizada com o objetivo de definir áreas com maior ou menor probabilidade de que a variável mercúrio esteja acima do nível de corte (mediana), estabelecendo assim o seu padrão de dispersão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam os resultados obtidos para a concentração de

mercúrio total nas duas profundidades examinadas, por unidade geológica, geomorfológica e de solos. A diferença existente entre o número de pontos amostrados por unidade, reflete a extensão da área espacial ocupada pela unidade dentro da sub-bacia, de tal sorte que unidades com pouca expressão territorial acabaram por ser menos amostradas, que outras que ocupam maiores áreas.

Krigagem indicativa

Para estabelecer o comportamento espacial da dispersão do mercúrio total presente nos solos da sub-bacia, especialmente no que se refere à dependência espacial entre as amostras e as direções de maior e menor continuidade, foram elaborados modelos semi-ariográficos para as duas profundidades do solo analisadas, utilizando-se o modelo esférico e as direções variográficas de 0°, 45°, 90° e 135°.

Em ambas as profundidades de solo foram observadas que a maior continuidade da dispersão de mercúrio total se verificava na direção 135° (NW/SE) e a maior variabilidade na direção 45° (NE/SW). Na área da sub-bacia, a direção NW/SE é aquela que acompanha a estruturação das feições geológicas, geomorfológicas e de solos, a qual é refletida no semi-ariograma sob forma de continuidade.

Para obtenção dos mapas através de krigagem indicativa (Figuras 4 e 5), foi usado como nível de corte a mediana, sendo que para a profundidade de 0 a 10 cm este valor é de 62,06 µg.kg⁻¹ e para a profundidade de 10 a 30 cm este valor é 67,13 µg.kg⁻¹ de mercúrio total. A cor de fundo varia de amarelo, representando as menores probabilidades, a vermelho, representando as maiores probabilidades de ocorrência de valores de mercúrio total acima do nível de corte.

Tabela 1: Concentração de mercúrio total presente nas amostras por unidade geológica.

VALORES DE MERCÚRIO TOTAL POR UNIDADE GEOLÓGICA				
UNIDADE GEOLÓGICA	Nº DE AMOSTRAS	MÉDIA GERAL*	MÉDIA 0 – 10 cm*	MÉDIA 10 – 30 cm*
Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	13	65,83	64,45	67,21
Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	60	37,50	39,20	35,80
Coberturas Terciário-Quaternárias Indiferenciadas	54	86,34	82,03	90,65
Formação Arenito Parecis	16	114,83	109,02	120,64
Formação Basalto Anari	6	135,38	133,59	137,18
Granitóides Tardi a Pós Rondonianos	2	96,76	100,61	92,92
Grupo Meta-Vulcano-Sedimentar Colorado do Oeste	17	103,00	104,00	102,00
Grupo Meta-Vulcano-Sedimentar Mutumparaná-Roosevelt	2	124,08	99,39	148,74
MÉDIA		95,46	91,53	99,39

* Valores expressos em $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

Tabela 2: Concentração de mercúrio total presente nas amostras por unidade geomorfológica

VALORES DE MERCÚRIO POR UNIDADE GEOMORFOLÓGICA				
UNIDADE GEOMORFOLÓGICA	Nº DE AMOSTRAS	MÉDIA GERAL*	MÉDIA 0 – 10 cm*	MÉDIA 10 – 30 cm*
Planícies Aluviais e Depressões	118	55,26	54,11	56,42
Superfície de Aplanamento	12	92,63	93,26	92,00
Agrupamento de Morros e Colinas	12	113,92	108,95	118,90
Superfícies Tabulares	29	129,19	126,04	132,35
MÉDIA		97,75	95,59	99,91

* Valores expressos em $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

Tabela 3: Concentração de mercúrio total presente nas amostras por unidade de solo

VALORES DE MERCÚRIO POR UNIDADE DE SOLO				
UNIDADE DE SOLO	Nº DE AMOSTRAS	MÉDIA GERAL*	MÉDIA 0 – 10 cm*	MÉDIA 10 – 30 cm*
Latossolo	74	100,92	97,56	104,29
Argissolo	9	88,60	86,79	90,42
Gleissolo	52	32,96	34,82	31,11
Neossolo Flúvico	26	63,09	61,79	64,40
Neossolo Quartzarênico	10	112,61	104,95	120,27
MÉDIA		79,63	77,18	82,09

* Valores expressos em $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

A análise dos mapas obtidos mostra que os padrões de dispersão do mercúrio total nas duas profundidades são semelhantes, com probabilidade de ocorrência de valores acima e abaixo do nível de corte tendendo a ocupar os mesmos espaços geográficos. As maiores probabilidades de ocorrência de valores acima do nível de corte ocupam a parte alta

da sub-bacia, dominada por rochas metamórficas, ígneas e sedimentares da Formação Parecis e pelos latossolos, argissolos e neossolos quartzarênicos, enquanto que as menores probabilidades ocupam a parte baixa, dominada por sedimentos terciário/quaternários e recentes e solos do tipo neossolos flúvicos e gleissolos.

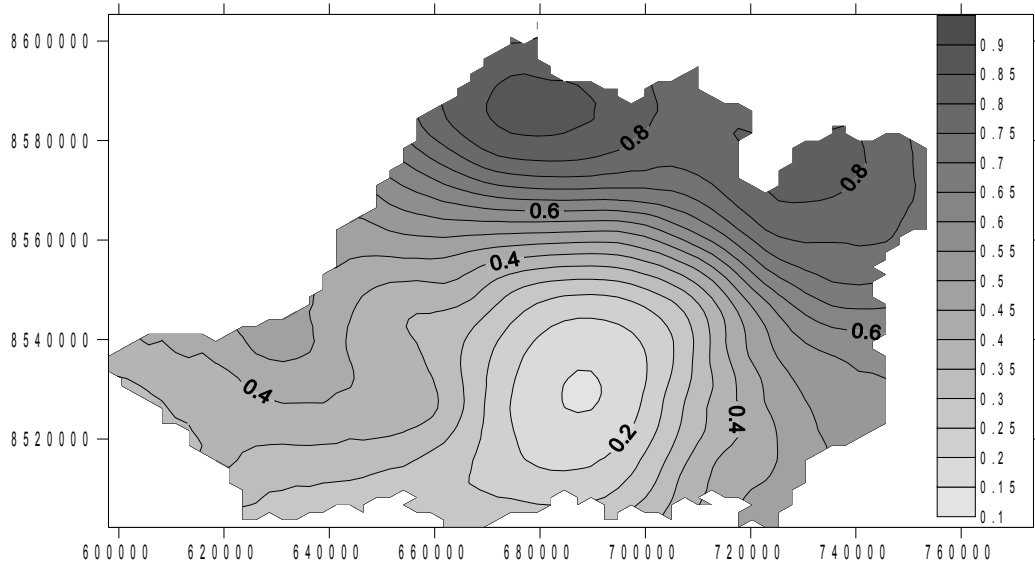


Figura 4: Mapa de isolinhas de mercúrio total na profundidade de 0 a 10 cm, obtidos por krigagem indicativa. Escala em $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

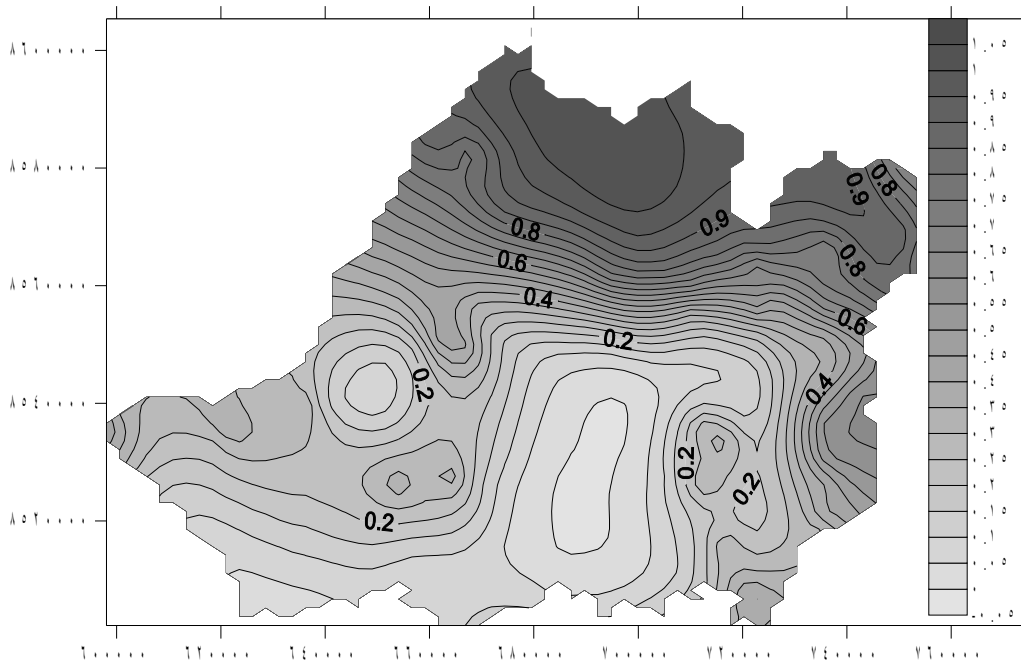


Figura 5: Mapa de isolinhas de mercúrio total na profundidade de 10 a 30 cm, obtidos por krigagem indicativa. Escala em $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

Chama a atenção na análise dos mapas, o fato do padrão de dispersão na profundidade de 0 a 10 cm apresentar uma aparente maior homogeneidade na dispersão, do que na profundidade de 10 a 30 cm. Esta aparente homogeneidade está representada pelo desenho mais suave das isolinhas, bem como pelo menor número de isolinhas para representar a distribuição.

Cabe ressaltar que, quando da edição do mapa, foram usados os mesmos critérios para estabelecimento das isolinhas, de tal sorte que a diferença no padrão de dispersão não resulta de edição, mas sim da representação real da dispersão.

Como o mercúrio em solos é um elemento mobilizável ou remobilizável, esta

aparente homogeneidade da camada superficial pode resultar da atuação mais intensa de fenômenos naturais, tais como a insolação, erosão e/ou a lixiviação, ou mesmo da ação antrópica, através da conversão de áreas de floresta em áreas de agricultura ou pastagem, como agentes da uniformização do padrão de dispersão do mercúrio.

Análise do padrão espacial da dispersão

Ao iniciar a discussão a respeito do padrão espacial da dispersão do mercúrio total na sub-bacia do Rio Corumbiara, é importante observar que os resultados não mostram diferenças significativas entre as duas profundidades, com probabilidade de ocorrência de valores acima e abaixo do nível de corte ocupando praticamente os mesmos espaços geográficos. Os resultados obtidos através do índice de correlação simples (Pearson) para os valores de mercúrio total presentes nas amostras de ambas as camadas foi de 0,877, indicam que há uma forte correlação entre os mesmos, de tal sorte que tendem a variar juntos, ou seja, a medida que o teor de mercúrio total tende a aumentar na profundidade de 0 a 10 cm, tende a aumentar também na profundidade de 10 a 30 cm e vice-versa. O deslocamento da nuvem de pontos no diagrama de dispersão indica que os valores tendem a aumentar com a profundidade.

O padrão de dispersão do mercúrio na sub-bacia apresenta uma clara variação de norte/nordeste para sul/sudoeste, tanto para a profundidade de 0 a 10 cm, como de 10 a 30 cm, com maior probabilidade de ocorrência de valores acima do nível de corte a norte/nordeste e menor probabilidade de ocorrência de valores acima do nível de corte no sul/sudoeste. Este padrão acompanha a geomorfologia da sub-bacia, uma vez que a maior probabilidade de ocorrência de valores acima do nível de corte se situa onde o relevo é mais elevado.

Os latossolos, argissolos e neossolos quartzarênicos ocupam a

totalidade da parte média/alta da sub-bacia, coincidindo com as unidades geomorfológicas de natureza erosiva (superfície de aplanamento, agrupamentos de morros e colinas e superfícies tabulares), assim como com as áreas de afloramento do embasamento e coberturas terciário-quadernárias indiferenciadas. Os latossolos apresentam média geral de 102,92 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, com médias parciais de 97,56 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade de 0 – 10 cm e 104,29 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade de 10 a 30 cm. Os argissolos apresentam média geral de 88,60 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, com médias parciais de 86,79 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade de 0 – 10 cm e 90,42 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade de 10 a 30 cm. Os neossolos quartzarênicos ocupam o topo da Formação Arenito Parecis e, conseqüentemente, a parte mais alta da sub-bacia. As concentrações de mercúrio total encontradas nas amostras apresentaram média geral de 112,61 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, com médias parciais de 104,95 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade de 0 – 10 cm e 120,27 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade de 10 a 30 cm.

A parte baixa da sub-bacia, é ocupada em sua maior parte pelos gleissolos, os quais apresentam média geral de 32,96 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ de mercúrio total, com média parciais de 34,82 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ para a profundidade de 0 a 10 cm e 32,82 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ para a profundidade de 10 a 30 cm. Os neossolos flúvicos, também ocorrentes na parte baixa da sub-bacia, apresentam média geral de 63,09 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ de mercúrio total, com média parciais de 61,79 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ para a profundidade de 0 a 10 cm e 64,40 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ para a profundidade de 10 a 30 cm. Estes solos coincidem com a unidade geomorfológica agradacional denominada de Planícies Aluviais e Depressões e com a unidade geológica constituída por Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos.

Os gleissolos ocorrem em regiões com excesso de água de forma periódica ou permanente, drenagem precária com déficit acentuado de oxigênio, em estado quase permanente de redução, desenvolvendo-se normalmente em regiões pantanosas, com abundância de matéria

orgânica. Estas condições favorecem a liberação de mercúrio contido no solo para o meio hídrico e a sua remoção do ambiente local, devido a reações de redução que produzem importantes modificações geoquímicas no ambiente, tais como a dissolução dos óxidos de ferro com liberação concomitante do mercúrio, conforme relatado por Roulet e Lucotte (1995) e Roulet et al. (1996).

Corroborando esta afirmativa os valores de mercúrio total encontrado nos neossolos flúvicos, no valor de aproximadamente o dobro do presente nos gleissolos, embora ambos ocupando a parte baixa da sub-bacia. A diferença entre ambos está justamente nas condições de hidromorfismo, redutoras e de abundante matéria orgânica presente nos gleissolos e ausentes no neossolo flúvico, de tal sorte que este último sofre menos ação química para liberação do mercúrio.

Estas relações se revestem de especial importância, na medida que a parte da sub-bacia ocupada pelos latossolos, argissolos e neossolos quartzarênicos é justamente aquela que se encontra sob intensa pressão antrópica, inicialmente pela atividade pecuária e atualmente pela implantação de lavouras de cana-de-açúcar e soja. Tais atividades favorecem os processos erosivos justamente onde a probabilidade de ocorrência de valores acima do nível de corte é maior e, conseqüentemente, a chegada do mercúrio ao meio hídrico.

A simples visualização do padrão de drenagem da sub-bacia (Figuras 6 e 7), mostra o quanto a região com maior probabilidade de ocorrência de valores acima do nível de corte se encontra sujeita à erosão, concentrando as nascentes da maioria dos igarapés que abastecem o Rio Corumbiara e as nascentes do próprio Rio Corumbiara.

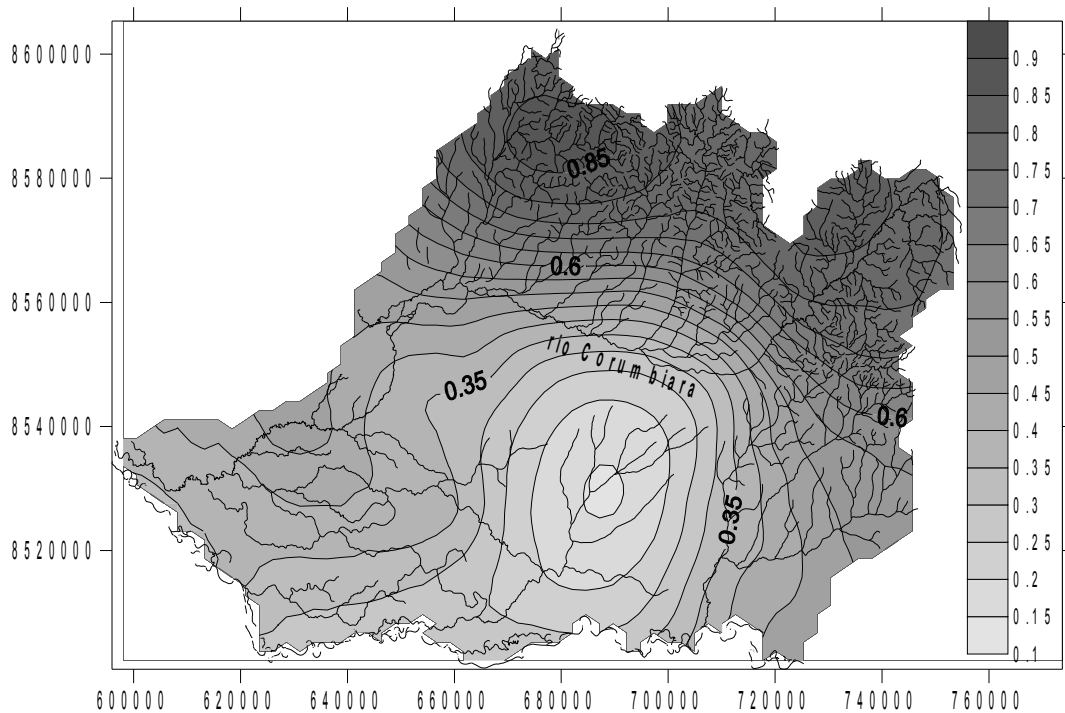


Figura 6: Mapa de probabilidade de ocorrência de valores acima do nível de corte mercúrio total na profundidade de 0 a 10 cm, obtidos por krigagem indicativa.

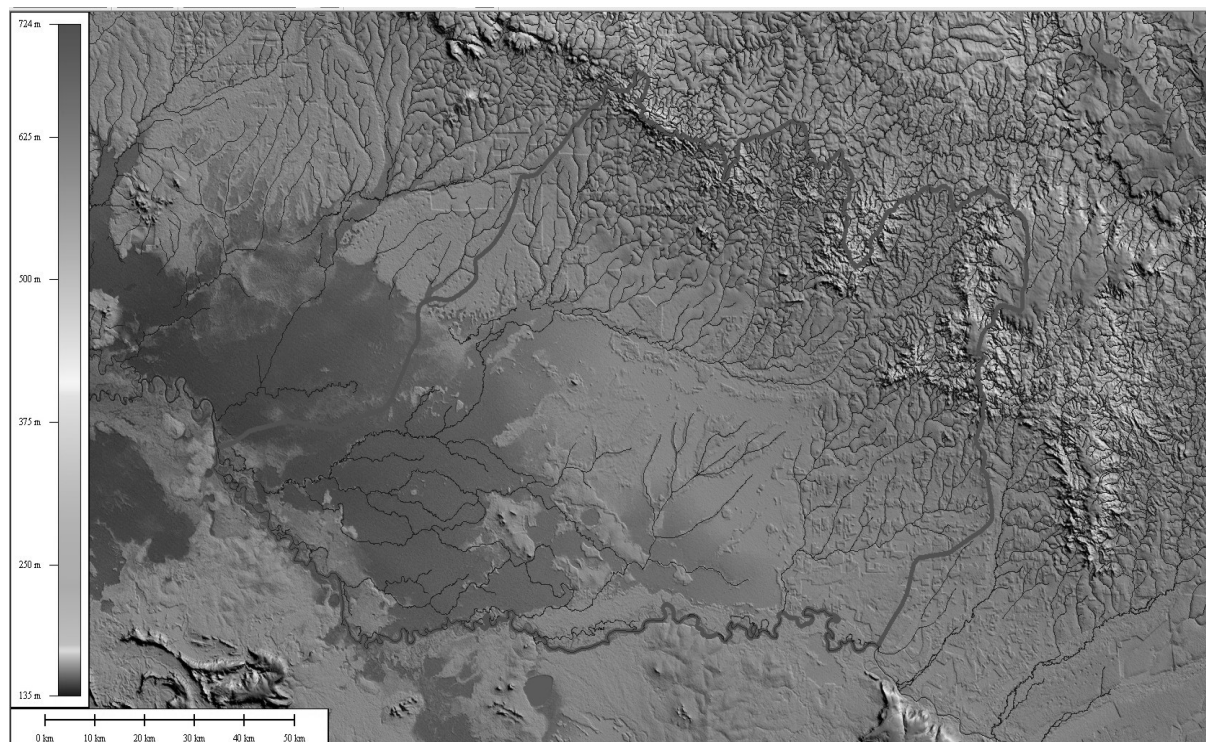


Figura 7: Imagem SRTM da área da sub-bacia do rio Corumbiara e adjacências, referente ao ano de 2006. Escala com altura em metros.

O Rio Corumbiara ocupa uma posição geograficamente estratégica na sub-bacia, pois se encontra em grande parte marcando o limite entre a parte baixa (planície aluvial a sul/sudoeste) e as unidades erosivas (unidades denudacionais a norte/nordeste). Seus tributários assumem aspecto arborescente junto as suas cabeceiras, localizadas na parte alta da sub-bacia, passando posteriormente a adquirir padrão paralelo, finalmente desaguando no Rio Corumbiara. Assim, o posicionamento do Rio Corumbiara o torna o grande coletor de mercúrio, seja sob forma de material particulado em suspensão, produto dos processos físicos erosionais, seja sob forma de mercúrio lixiviado ou metil-mercúrio.

É importante lembrar, conforme exposto por Roulet et al. (2000, 2001) que a erosão do solo é uma importante fonte de incremento nas concentrações de mercúrio em sedimentos superficiais de vários ecossistemas aquáticos e na coluna d'água, juntamente com finas partículas ricas em aluminossilicatos e óxidos e hidróxidos de

ferro e alumínio. Por outro lado, Wang et al. (2004), expressam que é a segunda fonte antropogênica mais importante para disponibilização de mercúrio para o meio hídrico e, segundo Rodrigues- ilho (2001), a terceira maior fonte de mercúrio da Amazônia Brasileira.

Ainda segundo Wang et al.(2004), os insumos agrícolas se constituem na quarta maior fonte antropogênica de mercúrio para o meio hídrico. Novamente, a parte alta da sub- acia é a região que se encontra sob maior pressão de expansão da agricultura, tanto no que se refere a implantação recente das lavouras de soja, quanto a implantação de industria canavieira na região.

Contribuindo ainda para agravar a situação, está o fato que o Rio Corumbiara, próximo a sua foz, corta a grande planície de inundação do Rio Guaporé, área baixa, periodicamente inundada pela cheia sazonal, momento em que o ambiente lacustrino/ pantanoso, com águas paradas, levemente ácidas, com pouca oxigenação e

muita matéria orgânica, favorece os processos de metilação e biodisponibilização do mercúrio. A cheia sazonal ocorre justamente no período das chuvas, que corresponde ao momento em que se intensificam os processos erosivos na parte alta da sub-bacia.

A imagem do Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (Figura 9), sob forma de modelo digital do terreno, é elucidativa no que se refere ao posicionamento espacial das unidades geológicas, geomorfológicas e de solos, bem como dos fenômenos erosivos e deposicionais que estão se processando. A análise visual da imagem permite identificar claramente as nascentes do Rio Corumbiara e seus principais tributários na parte alta da sub-bacia, com as rochas da Formação Arenito Parecis constituindo altos em forma de platôs. Estes platôs constituem a unidade geomorfológica denominada de Superfície Tabular e os solos presentes são os Neossolos Quartzarênicos.

Também na parte alta da sub-bacia, em nível inferior às rochas da Formação Arenito Parecis, porém onde o relevo se mostra significativamente movimentado, ocorre a Formação Basalto Anari, o Grupo Meta-Vulcano-Sedimentar Colorado do Oeste e os Granitos Tardi a Pós-Rondonianos. As unidades geomorfológicas correspondentes a estas unidades são o Agrupamento de Morros e Colinas e a Superfície de Aplanamento e os tipos de solo dominantes são o Latossolo e o Argissolo.

Na sequência, em direção ao centro da sub-bacia, onde o relevo se mostra sob forma de leques dissecados, ocorrem as Coberturas Terciário-Quaternárias indiferenciadas. Neste local, passa a vigorar o regime de deposição de sedimentos, com a unidade geomorfológica denominada de Planícies Aluviais e Depressões, permanecendo os Latossolos como dominantes, com a rede de drenagem tendendo a adquirir padrão paralelo.

Na parte mais baixa da sub-bacia ocorrem os Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos, os quais manifestam coloração azul clara na imagem e são recobertos por solos do tipo Neossolos Flúvicos. Ocorrem também os Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos, que manifestam coloração azul escura, com solos do tipo Gleissolo.

O Rio Corumbiara, como já ressaltado, tem suas nascentes e a de seus tributários em área erosiva e a partir do seu curso médio, passa a fluir sobre unidade geomorfológica de natureza deposicional, denominada de Planícies Aluviais e depressões. Tal fato permite inferir que os sedimentos erodidos na parte alta da sub-bacia, estão sendo depositados na parte baixa, especialmente onde se localizam os Gleissolos.

Este fato cria um paradoxo, uma vez que os solos erodidos apresentam as maiores concentrações relativas de mercúrio, com uma média de 100,71 g.kg⁻¹ (Neossolo Quartzarênico, Latossolo e Argissolo), enquanto que os solos presentes na parte baixa da sub-bacia apresentam as menores concentrações relativas de mercúrio total, com uma média de 48,02 g.kg⁻¹ (Neossolo Flúvico e Gleissolo). Considerando-se ainda que parte significativa do curso do Rio Corumbiara se posiciona sobre Gleissolos, a diferença fica mais acentuada, pois estes solos apresentam em média 32,96 g.kg⁻¹ de mercúrio total. Tal fato leva a crer que parte significativa do mercúrio presente nos sedimentos erodidos pelo Rio Corumbiara, ao se depositarem na parte baixa da sub-bacia, especialmente onde se posicionam os Gleissolos, deve estar sendo disponibilizada para o ambiente.

CONCLUSÕES

Os padrões de dispersão do mercúrio total presentes nas duas profundidades amostradas, indicam que as maiores concentrações se encontram na parte alta da sub-bacia, a norte/nordeste, ocupada pelos neossolos quartzarênicos

com 112,61 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, latossolos com 100,92 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ e Argissolos com 88,60 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, geomorfologicamente pelas unidades denudacionais (superfície tabular, agrupamento de morros e colinas e superfície de aplanamento) e geologicamente pela Formação Arenito Parecis, Formação Basalto Anari, Granitóides Tardi a Pós-Rondonianos, Grupo Meta-Vulcano-Sedimentar Colorado do Oeste e Coberturas Terciário-Quaternárias Indiferenciadas.

As menores concentrações de mercúrio total se encontram na parte baixa da sub-bacia, a sul/sudoeste, ocupada pelos neossolos flúvicos com 63,09 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ e Gleissolos com 32,96 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, geomorfologicamente pela Unidade Agradacional denominada de Planícies Aluviais e Depressões e geologicamente pelos Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos e Holocênicos.

Não foram diagnosticadas diferenças significativas no padrão de dispersão entre as profundidades amostradas, com tendência ao aumento dos teores em profundidade. O valor médio do mercúrio total presente nas duas profundidades de solo amostradas da sub-bacia foi de 74,54 $\mu\text{g.kg}^{-1}$, sendo 72,91

$\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade 0 – 10 cm e 76,18 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ na profundidade 10 – 30 cm, mostrando-se inferiores aos de outras regiões da Amazônia, tais como as bacias dos rios Negro, Tapajós, Madeira e da Serra do Navio.

A síntese da análise do padrão de dispersão do mercúrio total em solos da sub-bacia do Rio Corumbiara, é que a mesma possui a fonte de mercúrio (latossolos, argissolos e neossolos quartzarênicos da parte alta da sub-bacia, além das fontes antropogênicas), o mecanismo de remoção deste mercúrio do solo para chegada ao meio hídrico (estabelecimento de agricultura e pecuária em área de ocorrência de unidades geomorfológicas de natureza erosiva), o meio de transporte (Rio Corumbiara) o local adequado para a sua deposição e metilação (extensa planície aluvial do Rio Guaporé), todos concatenados. O aparente paradoxo entre a elevada concentração relativa de mercúrio total nos sedimentos erodidos pelo Rio Corumbiara e as concentrações relativamente baixas nos sedimentos da área de deposição, pode ser explicado pela natureza pantanosa do ambiente, o qual favorece a metilação e a remoção do mercúrio destes sedimentos.

REFERENCES

- AKAGI, H.; MALM, O.; BRANCHES, F.J.P.; KINJO, Y.; KASHIMA, Y.; GUIMARÃES, J.R.D.; OLIVEIRA, R.B.; HARAGUCHI, K.; PFEIFFER, W.C.; TAKIZAWA, Y. (1994) Human exposure to mercury due to goldmining in the Tapajós River Basin Amazon, Brazil: speciation of mercury in human hair, blood and urine. *Water, Air and Soil Pollution*, 80: 85-94.
- BASTOS, W.R.; MALM, O.; PFEIFFER, W.C.; CLEARY, D. (1998) Establishment and analytical quality control of laboratories for Hg determination in biological and geological samples in the Amazon, Brazil. *Ciência e Cultura*, 50: 255-260.
- BAEYENS, W.; EBINGHAUS, R.; VASILIEV, O. (1996) Global and regional mercury cycles: sources, fluxes and mass balance. Dordrecht: Kluwer Academi Publishers, 588 p.
- BARBOSA, A.C.; DE SOUZA, J.; DÓREA, J.G.; JARDIM, W.F.; FADINI, P.S. (2003) Mercury Biomagnification in a Tropical Black Water, Rio Negro, Brazil. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 45: 235-246.

- BISINOTI, M.C. & JARDIM, W.F.O. (2004) Comportamento do metilmercúrio (MetilHg) no ambiente. *Química Nova*, 4: 593-600.
- BRANCHES, F.J.; ERICKSON, T.B.; AKS, S.E.; HRYHORCZUK, D.O. (1993) The price of gold: mercury exposure in the Amazonian rain forest. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 31: 295-306.
- FADINI, P.S. & JARDIM, W.F. (2001) Is the Negro River Basin (Amazon) impacted by naturally occurring mercury? *The Science of the Total Environment*, 275: 71-82.
- FOSTIER, A.H.; FORTI, M.C.; GUIMARÃES, J.R.; MELFI, A.J.; BOULET, R.; ESPIRITO SANTO, C.M.; KRUG, F.J. (2000) Mercury fluxes in a natural forested Amazonian catchment (Serra do Navio, Amapá State, Brazil). *The Science of the Total Environment*, 260: 201-211.
- GUIMARÃES, J.R.D; MEILI, M.; MAIL, O.; BRITO E.M.S. (1998) Hg methylation in sediments and floating meadows of a tropical lake in the pantanal floodplain, Brazil. *The Science of the Total Environment*, 213: 165-175.
- GUIMARÃES, J.R.D. (2000) Mercury methylation along a lake-forest transect in the Tapajós River floodplain, Brazilian Amazon: seasonal and vertical variations. *The Science of the Total Environment*, 261: 91-98.
- LACERDA, L.D.; PFEIFFER, W.C.; BASTOS, W.R. (1991) Mercury dispersal in the Pocone Region, Mato Grosso State, Central Brazil. *Ciência e Cultura*, 43: 317-320.
- LACERDA, L. D. (1995) Amazon mercury emission. *Nature*, 374: 20-21.
- LACERDA, L.D.; RIBEIRO JUNIOR, M.G.; SOUZA, M.; AYRES, G.A. (1999) Distribuição de mercúrio em solos e sedimentos lacustres na região de Alta Floresta, MT. *Rio de Janeiro: CETEM/MCT*, n. 3, 23p.
- LEBEL, J. (1999) Mercury poisoning in the Amazon: the tip of the iceberg. *International Development Research Centre, Canadá*.
- MALM, O. (1991) Estudo da contaminação ambiental e humana por Hg na região garimpeira de ouro do Rio Madeira, Amazônia. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biofísica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MALM, O; CASTRO, M.B.; BASTOS, W.R.; BRANCHES, F.J.P.; ZUFFO, C.E.; PFEIFFER, W.C. (1995) An assessment of Hg pollution in different goldmining areas, Amazon Brazil. *The Science of the Total Environment*, 175: 127-140.
- MALM, O. (1998) Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environmental Research*, 77: 73-78.
- MEECH, J.A.; VEIGA, M.M.; TROMANS, D. (1997) Emissions and stability of mercury in the Amazon. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36: 231-239.
- MIRETZKY, P.; BISINOTI, M.C.; JARDIM, W.F.; ROCHA, J.C. (2005) Factors affecting Hg (II) adsorption in soils from the Rio Negro basin (Amazon). *Química Nova*, 28(3): 438-443.

- PFEIFFER, W.C.; LACERDA, L.D.; MALM, O.; SOUZA, C.M.M.; SILVEIRA, E.G.; BASTOS, W.R. (1989) Mercury concentrations in inland waters of gold mining áreas in Rondônia, Brazil. *The Science of the Total Environment*, 87/88: 233-240.
- PIRRONE, N. & MAHAFFEY, R.D. (2005) Dynamics of Mercury pollution on regional and global scales. New York: Springer, 744p.
- RODRIGUES-FILHO, S.; RIBEIRO JR, M.G.; VILLAS BÔAS, R.C. (2008) Hg geochemical dynamics as a reference for environmental control in gold mining sites. Disponível em: <<http://w3.cetem.gov.br/imaac/Publications/Books/Mercury.pdf>>. Acessado em: 06 nov. 2008.
- ROULET, M. & LUCOTTE, M. (1995) Geochemistry of mercury in pristine and flooded ferrallitic soils of a tropical rain forest in French Guiana, South America. *Water Air Soil Pollution*, 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: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE GEOCHEMISTRY OF THE EARTH'S SURFACE, 4., 1996, Edinburg. Proceedings...Edinburg, 1996, p. 453-457.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; SAINT-AUBIN, A.; TRAN, S.; RHÉAULT, I.; FARELLA, N.; SILVA, E.J.; DEZENCOURT, J.; PASSOS, C.J.; SOARES, G.S.; GUIMARÃES, J.R.D.; 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. *The Science of Total Environment*, 223: 1-24.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; FARELLA, N.; SERIQUE, G.; COELHO, H.; PASSOS, C.J.S.; SILVA, E.J.; ANDRADE, P.S.; MERGLER, D.; GUIMARÃES, J.R.D.; AMORIM, M. (1999) Effects of the human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*, 112: 297-313.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; CANUEL, R.; FARELLA, N.; COURCELLES, M.; GUIMARÃES, J.R.D.; MERGLER, D.; AMORIM, M. (2000a) Increase in mercury contamination recorded in lacustrine sediments following deforestation in the central Amazon. *Chemical Geology*, 165: 243-266.
- ROULET, M.; LUCOTTE, M.; GUIMARÃES, J.R.D.; RHEAULT, I. (2000b) Methylmercury in water, seston and epiphyton of an Amazonian River and its floodplain, Tapajós River, Brazil. *The Science of Total Environment*, 261: 43-59.
- ROULET, M.; GUIMARÃES, J.R.D.; LUCOTTE, M. (2001) Methylmercury production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain – effect of seasonal inundation. *Water, Air and Soil Pollution*, 128: 41-60.
- VEIGA, M.M.; MEECH, J.A.; OÑATES, N. (1994) Mercury Pollution from Deforestation, *Nature*, 368: 816-817.
- WANG, Q.; KIM, D.; DIONYSIOU, D.D.; SORIAL, G.A.; TIMBERLAKE, D. (2004) Sources and Remediation for Mercury Contamination in Aquatic Systems – a Literature Review. *Environmental Pollution*, 131: 323-336.