



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
Núcleo de Ciências e Tecnologia
Programa de Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente

ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS
DO ALTO RIO MADEIRA, RONDÔNIA.

JOÃO PAULO DE OLIVEIRA GOMES

Porto Velho (RO)
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
Núcleo de Ciências e Tecnologia

ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS
DO ALTO RIO MADEIRA, RONDÔNIA.

JOÃO PAULO DE OLIVEIRA GOMES

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Área de Concentração em Diagnóstico Ambiental, para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente.

Porto Velho (RO)
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

GOMES, J. P.O.

Elementos-traço em solos do Alto rio Madeira, Rondônia.

Porto Velho: s.n., 2009.

xii, 69 p.

Dissertação – Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente. Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR.

Orientador: Prof^o. Dr. José Vicente Elias Bernardi

1. Rio Madeira 2. Solos 3. Elementos-traço 4. Mercúrio

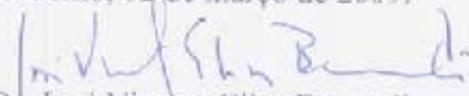
NÚCLEO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO REGIONAL E MEIO AMBIENTE

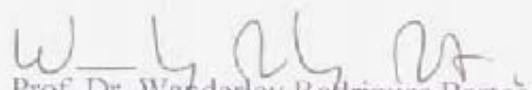
ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

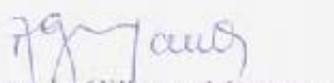
JOÃO PAULO DE OLIVEIRA GOMES

A Banca de defesa de Mestrado presidida pelo orientador *Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi* e constituída pelos examinadores *Prof. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos* e *Prof. Dr. Angelo Gilberto Manzatto* reuniu-se no dia 02 de março de 2009, às 10:00 horas, no mini-auditório do PGDRA-UNIR Campus para avaliar a Dissertação de Mestrado intitulada "ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS MARGINAIS DO ALTO RIO MADEIRA, RONDÔNIA" do mestrando João Paulo de Oliveira Gomes. Após a explanação do candidato e arguição pela Banca Examinadora, a referida dissertação foi avaliada e de acordo com as normas estabelecidas pelo Regimento do Curso de Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente – PGDRA foi APROVADO.

Porto Velho, 02 de março de 2009.


Prof. Dr. José Vicente Elias Bernardi
Orientador


Prof. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos
Examinador


Prof. Dr. Angelo Gilberto Manzatto
Examinador

Prof. Dr.^a Mariangela Soares de Azevedo
Suplente

Distinção e Louvor


DEDICATÓRIA

Aos meus pais Gustavo e Dalva,
pelo exemplo de vida, e a minha esposa
Elisabete com todo meu amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar por ter-me colocado no mundo e guiado meus caminhos até este momento da minha vida;

Ao meu orientador Prof^o. Dr. José Vicente Elias Bernardi pela orientação, paciência, incentivo e amizade sincera que permitiram a realização deste trabalho;

Ao Prof^o. Dr. Wanderley Rodrigues Bastos por ter apostado suas fichas em mim ao me iniciar no mundo científico, pela orientação, paciência, amizade e incentivo, sem os quais não seria possível realizar este trabalho;

A minha família, em especial a minha mãe Dalva e ao meu pai Gustavo, por tudo que me ensinaram e ainda ensinam no caminhar da vida, pela confiança, incentivo, e principalmente pelo incondicional amor que me dedicam; e a minha amada esposa Elisabete por todo amor, apoio, paciência, compreensão e carinho;

A toda equipe do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental em especial para Ronaldo Cavalcante (Kabção), Ronaldo de Almeida (Tapyrus), Giselle (Taz), Greicyleia (Draguinha), Darly (Catatau), Janeide (Mamolenga), Dario (Carioca Marrento), Juliana (Crazy), Cibelle, Tchê, Jaca, Ynhaná, Tiago, Déborah, João Hermann, Alessandra, Ailton, Ândrio, Daniela, Igor, Roberta, pela amizade, paciência, incentivos, ensinamentos e troca de experiências que foram muito importantes para minha formação e conclusão deste trabalho;

À Mariângela, Maniesi, Ariott, Wanderley, Vicente, Moret, Gil e demais professores do Departamento de Biologia e do Mestrado pelos conhecimentos transmitidos, que tanto contribuíram para a minha formação acadêmica;

Aos meus amigos de turma: Janeide, Darly, Alessandra, Déborah, Cibelle, Ivonete, Érica, Cléber entre outros, pelos momentos de descontração e pela amizade;

Aos amigos do IBAMA, ICMBio e SIPAM pelos momentos trabalho, descontração e pela amizade;

Aos órgãos financiadores: CNPq e Furnas Centrais Elétricas do Brasil S.A., pelo apoio financeiro e logístico empregado na realização deste trabalho; e aos meus pais pela grana despendida na minha estadia de 4 anos no curso de Biologia em Porto Velho.

“Alguns cientistas usam a estatística como os bêbados usam os postes: mais para apoio do que para iluminação. Pois, os números são como pessoas, torturem-nos e eles contam qualquer coisa”.

(Andrew Lang)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
1.1. ELEMENTOS-TRAÇO NO MEIO AMBIENTE	15
1.2. ESTUDOS DE ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DO BRASIL	19
1.3. ESTUDOS DE ELEMENTOS-TRAÇO NO RIO MADEIRA	22
2. OBJETIVOS	26
2.1. GERAL	26
2.2. ESPECÍFICOS	26
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.1.1. Clima	27
3.1.2. Hidrografia	27
3.1.3. Geologia	29
3.1.4. Pedologia	32
3.1.5. Vegetação	34
3.2. DESENHO AMOSTRAL	36
3.3. AMOSTRAGEM	38
3.4. MÉTODOS ANALÍTICOS	38
3.4.1. Extrações Químicas	39
3.4.2. Espectrofotometria de Absorção Atômica	39
3.4.3. Análise dos dados	40
3.4.3.1. Análise de Componentes Principais – PCA	41

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. CONTROLE DE QUALIDADE	44
4.2. ELEMENTOS-TRAÇO NOS SOLOS DO ALTO RIO MADEIRA E VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA	44
4.3. ELEMENTOS-TRAÇO NAS DIFERENTES CLASSES DE SOLOS	48
4.4. ELEMENTOS-TRAÇO E OS DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO	52
4.5. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS – ACP	54
4.6. MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ELEMENTOS-TRAÇO DAS COMPONENTES ANTRÓPICAS	58
4.6.1. Mapas de distribuição espacial de Hg nos solos	58
4.6.2. Mapas de distribuição espacial de Pb nos solos	61
CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Densidade dos principais elementos-traço.	15
Tabela 02. Função biológica, toxicidade para plantas e animais de alguns elementos-traço.	16
Tabela 03. Concentrações de alguns elementos-traço na crosta terrestre, solos do mundo, solos do Brasil e solos de cerrado.	17
Tabela 04. Adições globais de alguns elementos-traço ao solo (10^6 Kg ano ⁻¹).	18
Tabela 05. Valores orientadores para elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) em solos de São Paulo.	20
Tabela 06. Concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) encontrados em solos do Brasil.	21
Tabela 07. Concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) encontradas em solos, sedimentos de fundo e sedimentos em suspensão do Alto rio Madeira.	25
Tabela 08. Limites de Detecção da Técnica (LDT) para cada elemento-traço analisado.	40
Tabela 09. Concentração de Hg ($\mu\text{g.g}^{-1}$) e Mn ($\mu\text{g.g}^{-1}$) em amostras de Referência Certificada de sedimento.	44
Tabela 10. Concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$ -ppm) nos solos do Alto do rio Madeira e em solos de diferentes trabalhos.	47
Tabela 11. Estatística descritiva das concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$ - ppm) nas classes de solos do Alto do rio Madeira.	51
Tabela 12. Autovalores e a variância explicada das 8 componentes obtidas dos elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira.	54
Tabela 13. Contribuição de cada elemento-traço para as 3 componentes principais obtidas.	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Processos dinâmicos interativos que governam a solubilidade, disponibilidade e mobilidade de elementos-traço nos solos.	19
Figura 02. Produção oficial e estimada de ouro no rio Madeira.	23
Figura 03. Mapa das sub-bacias hidrográficas na área em estudo.	28
Figura 04. Mapa das unidades geológicas na área em estudo.	31
Figura 05. Mapa das classes de solos da área em estudo.	33
Figura 06. Mapa das formações vegetacionais na área em estudo.	35
Figura 07. Malha de amostragem geoquímica com a localização dos pontos coletados no Alto rio Madeira e afluentes nas duas expedições realizadas.	37
Figura 08. Gráficos Box-plots das concentrações de elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira.	52
Figura 09. Gráfico dos autovalores e porcentagem de variância explicada das 8 componentes principais obtidas dos dados.	55
Figura 10. Projeção espacial de ordenação das cargas dos elementos-traço na CP 1 versus CP 2.	57
Figura 11. Projeção espacial de ordenação dos escores na CP 1 versus CP 2.	58
Figura 12. Mapa temático com a distribuição espacial das concentrações de Hg em solos ao longo do Alto rio Madeira.	59
Figura 13. Mapa temático com a distribuição espacial das concentrações de Pb em solos ao longo do Alto rio Madeira.	62

RESUMO

GOMES, J.P.O. *Elementos-traço em solos do Alto rio Madeira, Rondônia*. Porto Velho, 2009. 69p. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar as concentrações dos elementos-traço: Cd, Cu, Cr, Co, Pb, Zn, Mn, Fe e Hg, em solos do Alto rio Madeira e afluentes. As amostragens foram realizadas nos períodos de 22/11 a 25/11/2003 e 22/02 a 25/02/2004. O desenho amostral foi baseado em uma malha experimental composta de 22 pontos de coleta nas margens do Alto rio Madeira com intervalos de 12,5 Km e os afluentes foram amostrados entre 5 e 10 Km de sua foz com o rio Madeira, totalizando 32 amostras. As coletas foram realizadas com auxílio de trado holandês, amostrando-se a fração superficial de até 30 cm de profundidade. Em laboratório as amostras foram remetidas à peneiração úmida, utilizando-se a fração <0,075mm. Posteriormente as amostras foram submetidas a extrações ácidas segundo a metodologia descrita em APHA (1971), e para o elemento Hg utilizou-se a metodologia proposta por BASTOS *et al.*, (1998). As análises quantitativas dos elementos-traço foram realizadas por espectrofotometria de absorção atômica – AAS. Os solos analisados na área de estudo apresentaram os seguintes intervalos de concentração de elementos-traço (em $\mu\text{g.g}^{-1}$): Cd (<0,086 - 0,09); Co (<0,19 - 10,98); Cr (3,06 - 12,46); Cu (1,59 - 14,45); Pb (1,78 - 13,78); Zn (7,04 - 95,35); Mn (17,75 - 1000,98); Fe (4.002,88 - 41.294,75); e Hg (0,023 - 0,225). Comparando-se os resultados obtidos no presente estudo com os valores orientadores de Referência de Qualidade (VRQ) e Prevenção (VP) da CETESB (2005), e os valores de referência, considerados normais para elementos-traço em solos brasileiros não poluídos, propostos por Fadigas *et al.* (2006), constata-se que os solos do Alto rio Madeira apresentam concentrações de elementos-traço em similaridade com os valores encontrados em condições naturais, exceto as concentrações de Hg que apresentaram claramente a influência antrópica das áreas de garimpo. A análise de componentes principais ordenou os elementos-traço mais relacionados à composição natural dos solos (Co, Cu, Cr, Zn, Mn e Fe) e aqueles com maior influência antrópica (Pb e Hg). Além de demonstrar alguns fatores que influenciam para a variabilidade das concentrações de elementos-traço nas diferentes amostras de solos. Já os mapas temáticos de distribuição espacial dos elementos-traço Hg e Pb, evidenciaram melhor as influências exercidas pelas áreas de maior atividade garimpeira como fontes para o aumento nas concentrações de Hg, e pelos resíduos automobilísticos gerados nas rodovias BR 364 e BR 425 para o aumento de Pb nos pontos mais próximos. Por fim, ressalta-se que é fundamental dar continuidade aos estudos biogeoquímicos no Alto rio Madeira, haja vista as transformações que ocorrerão nessa região devido aos projetos hidroelétricos das cachoeiras de Santo Antônio e Jirau.

PALAVRAS-CHAVE: rio Madeira; solos; elementos-traço; mercúrio.

ABSTRACT

GOMES, J.P.O. *Trace-elements in soils of Upper Madeira river, Rondônia*. Porto Velho, 2009. 69p. Dissertation. Postgraduate Program in Regional Development and Environment, Foundation University Federal of Rondônia – UNIR.

The objective of this work was to evaluate the trace-elements concentrations: Cd, Cr, Cu, Zn, Pb, Fe, Co, Mn and Hg, in soils of the Upper Madeira river and tributaries. Samplings were collected in periods of 22/11 to 25/11/2003 and 22/02 to 25/02/2004. The sample design was based a experimental mesh composed of 22 collection's points on the banks of the Upper Madeira river at 12.5 km intervals and the tributaries were sampled between 5 and 10 km from its mouth with the Madeira river, totaling 32 samples. The collections were made using of dutch auger, sampling the surface fraction until 30 cm of depth. In laboratory samples were sent to wet sieving, using the fraction <0.075mm. Subsequently the samples were subjected to acid extraction according to the methodology described in APHA (1971), and to Hg element it was used the methodology proposed by BASTOS *et al.* (1998). The quantitative analysis of trace-elements were performed by atomic absorption spectrophotometry - AAS. The soils analyzed in the study area showed the following variation of trace-elements concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$): Cd (<0.086 - 0.09), Co (<0.19 - 10.98), Cr (3.06 - 12.46), Cu (1.59 - 14.45), Pb (1.78 - 13.78), Zn (7.04 - 95.35), Mn (17.75 – 1000.98), Fe (4002.88 – 41294.75) and Hg (0.023 – 0.225). Comparing the results obtained in this study with the values of Reference Quality (VRQ) and Prevention (VP) of CETESB (2005), and the reference values, considered normal for trace-elements in Brazilian soils not polluted, proposed by Fadigas *et al.* (2006), finds that the soils of the Upper Madeira river present trace-elements concentrations in similarity to values found in natural conditions, except the Hg concentrations which clearly show the anthropogenic influence of gold mining areas. The principal components analysis ordered trace-elements more related to natural soil composition (Co, Cu, Cr, Zn, Mn and Fe) and those with greater human impact (Pb and Hg). In addition it showed some factors that influence the variability of trace-elements concentrations in different samples of soils. The thematic maps of spatial distribution of trace-elements, Hg and Pb, better showed the influences exerted by areas of higher gold mining activity as sources for the increase in Hg concentrations, and by the automobile waste generated in the BR 364 and BR 425 roads to the increase of Pb in points ahead. Finally, it is emphasized that is essential to continue biogeochemical studies in the Upper Madeira River, due to the changes that will occur in this region because of hydroelectric projects of the Santo Antônio and Jirau waterfalls.

KEYWORDS: Madeira river; soils; trace elements; mercury.

INTRODUÇÃO

A análise geoquímica é uma ferramenta que vem sendo utilizada com bastante sucesso pela prospecção mineral na identificação de anomalias, ou seja, jazidas minerais. Atualmente esse método também vem sendo empregado para a avaliação de questões ambientais, como a composição química do ar, da água e do solo, orientando assim estudos na potencialidade de ocorrência de problemas nutricionais (em plantas e animais), ambientais, e de exposição ecotoxicológica humana.

Nos últimos 30 anos, as concentrações de alguns elementos-traço em solos de determinadas regiões do mundo têm merecido especial atenção, sendo reconhecidos como um problema que pode representar sérios riscos toxicológicos à saúde da população e ao meio ambiente.

Por estas razões vários países têm focado políticas públicas em três aspectos principais: determinação das concentrações de elementos-traço em solos, água, sedimentos, plantas, animais, dentre outras matrizes; estabelecimento de níveis de referência em ambientes naturais; conhecimento da distribuição geográfica e do comportamento desses elementos tanto em ambientes naturais, quanto naqueles ambientes que já sofreram impacto da ação humana. Assim, a delimitação de áreas ou regiões aonde haja abundância ou escassez de elementos-traço pode ser utilizado como indicador ou rastreador de: lançamento de efluentes industriais sólidos, líquidos, partículas ou gases (ex. Pb e V); efluentes domésticos (especialmente As, Cr, Cu, Mn e Ni); atividades de mineração à exemplo dos garimpos de ouro (ex. Hg); águas superficiais provenientes de áreas cultivadas com adubos químicos e defensivos agrícolas (estes contêm os mais variados elementos como o Cd, Hg, Pb, Cu, etc.); e variações naturais na cobertura dos solos (NRIAGU & PACYNA, 1988).

Contudo, em muitos países em desenvolvimento como o Brasil, as informações referentes aos níveis naturais ou referenciais de elementos-traços nos solos são escassas e concentradas em algumas regiões do país, comumente sudeste e sul, e apenas para alguns elementos. Geralmente aqueles que são micro ou macronutrientes para plantas. Sem esses dados, setores governamentais responsáveis pela execução das políticas ambientais não podem identificar e monitorar as alterações químicas que ocorram no ambiente, e que podem trazer problemas ao equilíbrio do meio ambiente e por consequência à saúde humana.

No estado de Rondônia, especificamente na região do rio Madeira, os estudos referentes às concentrações de elementos-traço em solos são escassos, tendo em vista as poucas publicações referentes ao assunto. Nesta região os estudos geoquímicos estão focados

na contaminação ambiental por mercúrio ocasionada pela atividade garimpeira de ouro de aluvião, estabelecida desde a década de 70. O mercúrio metálico (Hg^0) usado pelos garimpeiros como agente amalgamador de ouro persiste até os dias atuais nos mais diversos compartimentos bióticos e abióticos ao longo do rio Madeira. O fato de ser um elemento com capacidade de biocumulação e biomagnificação ao longo da cadeia trófica, o torna de especial interesse como elemento tóxico para estudos nessa região.

Entre os estudos realizados para melhor entender o comportamento deste elemento na região do rio Madeira, cita-se: Lacerda *et al.* (1987); Martinelli, *et al.* (1988); Pfeiffer & Lacerda (1988); Pfeiffer *et al.* (1989); Malm *et al.* (1991); Lechler *et al.* (2000); Maurice-Bourgoin *et al.* (2000); Bonotto & Silveira (2003); Bastos & Lacerda (2004). Grande parte destes estudos foram realizados em solos, sedimentos em suspensão e de fundo, em lagos e rios, peixes e humanos através da exposição alimentar e ocupacional. Porém, quanto aos demais elementos-traço, não existem dados suficientes nesta região, principalmente sobre níveis de referência em solos do rio Madeira.

Devido aos fatores já mencionados, a proposta de uma avaliação geoquímica dos solos torna-se muito importante no Alto rio Madeira, principalmente no sentido de diagnosticar este ambiente, ainda com poucos distúrbios ambientais, e contribuir assim para mitigar ao máximo os futuros impactos ambientais decorrentes do desenvolvimento regional. Prevenindo possíveis riscos à saúde humana através da contaminação da água para consumo, do estoque pesqueiro que é a fonte protéica primária da população ribeirinha amazônica, dos produtos agrícolas produzidos em culturas perenes nas várzeas nos períodos de seca, entre outros.

Ressalta-se a importância desta avaliação geoquímica na região do Alto rio Madeira, já que a mesma é foco de ampliação do potencial energético regional com os projetos de aproveitamento hidroelétrico do rio Madeira, em fase de construção nas cachoeiras de Jirau e Santo Antônio.

Estes empreendimentos alterarão diretamente o meio ambiente durante a sua implantação com a inundação de 5 Km de floresta nas margens do rio Madeira, e posteriormente acarretará num desenvolvimento sócio-econômico da região com a projeção de crescimento industrial e populacional. Desta forma, são necessários estudos geoquímicos prévios sobre os níveis referenciais de elementos-traços nos solos para melhor conhecer a área que será inundada, e que conseqüentemente poderá disponibilizar para o sistema aquático esses elementos.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. ELEMENTOS-TRAÇO NO MEIO AMBIENTE

Quando se aborda o tema elementos-traço, um dos primeiros aspectos enfocados refere-se ao conceito deste termo, bem como as várias denominações que este grupo de elementos recebe na literatura. O termo *elemento-traço* tem sido usado para definir metais catiônicos e oxianions que normalmente estão presentes em baixas concentrações no meio ambiente, usualmente $<1\text{g.Kg}^{-1}$. Muito embora elementos como Al, Fe e Mn, os quais ocorrem em maiores concentrações na litosfera (principalmente em ecossistemas tropicais), também sejam tratados como elementos-traço por alguns autores. Este termo tem sido adotado em diversas publicações recentes que tratam desse assunto (McBRIDE, 1994; KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001; BONOTTO & SILVEIRA, 2003; MARQUES *et al.*, 2004; GUILHERME *et al.*, 2005; GOMES *et al.*, 2009), em detrimento da expressão *metal pesado*, que se refere aos metais com densidade acima de $5,0\text{ (g/cm}^3\text{)}$, nunca ter sido definida pelos órgãos oficiais na área de química (ex. IUPAC) (tabela 01).

Tabela 01. Densidade dos principais elementos-traço.

METAL (Símbolo)	DENSIDADE (g/cm^3)	METAL (Símbolo)	DENSIDADE (g/cm^3)
Alumínio (Al)	2,7	Mercúrio (Hg)	14,1
Chumbo (Pb)	11,3	Cobalto (Co)	8,9
Cobre (Cu)	8,9	Zinco (Zn)	7,1
Crômo (Cr)	7,2	Cádmio (Cd)	8,4
Ferro (Fe)	7,8	Manganês (Mn)	7,4

Alguns elementos-traço são considerados essenciais do ponto de vista biológico, enquanto outros não o são. Um elemento é dito essencial quando faz parte de um composto vital ou quando participa de reações bioquímicas cruciais para o metabolismo de um organismo. Contudo, elementos como Cd, Pb, As e Hg, não desempenham funções nutricionais ou bioquímicas conhecidas em animais ou plantas. A toxicidade destes elementos não essenciais reside principalmente na capacidade de competir com nutrientes minerais (cálcio, zinco, ferro, selênio, etc). Entretanto, mesmo aqueles essenciais podem, sob condições específicas, causar impactos negativos aos seres vivos (tabela 02). Para elementos

que possuem a característica de causar danos, a redução da exposição é a única maneira efetiva de se diminuir o risco ambiental e à saúde humana (GUILHERME *et al.*, 2005).

Tabela 02. Função biológica, toxicidade para plantas e animais de alguns elementos-traço.

Elemento	Função Biológica	Toxicidade relativa ^a	
		Plantas ^b	Mamíferos
Cd	Nenhuma conhecida	MA(5-30)	A (cumulativo)
Cr	Parece estar envolvido no metabolismo de açúcares em mamíferos	MA(5-30)	A(Cr ⁶⁺) M(Cr ³⁺)
Cu	Essencial para todos os organismos. Cofator em enzimas redox e no transporte de O ₂	MA(20-100)	M
Co	Essencial para todos os organismos. Cofator em numerosas enzimas. Importante na fixação de N ₂	MA(15-50)	M
Zn	Essencial para todos os organismos. Cofator em muitas enzimas.	BM(100-400)	BM
Mn	Essencial para todos os organismos. Cofator em muitas enzimas. Envolvido na reação de quebra da água na fotossíntese.	BM(300-500)	A (cumulativo)
Pb	Nenhuma conhecida.	M(30-300)	A (cumulativo)
Fe	Essencial para todos os organismos. Cofator em muitas enzimas e proteínas heme.	B(>1000)	B
Hg	Nenhuma conhecida.	A (1-3)	A (cumulativo)

Nota: Letras classificam a toxicidade como baixa (B), moderada (M) e alta (A); Números entre parênteses denotam a concentração do elemento no tecido foliar (mg.Kg⁻¹ base em peso seco) que mostra toxicidade em plantas.

Fonte: Dados compilados de McBride (1994).

Os elementos-traço podem estar presentes naturalmente em partículas atmosféricas, águas superficiais e sub-superficiais, solos, sedimentos e outros compartimentos. As concentrações naturais são bastante baixas, geralmente teores que chegam a 1 parte por bilhão (1ppb = 1µg.Kg⁻¹ ou 1µg.L⁻¹), o que normalmente está abaixo do limite de detecção da maioria dos métodos de análise (McBRIDE, 1994). Já as concentrações anômalas podem ocorrer tanto em razão de processos naturais, dependendo da formação geológica da região e da composição química do material de origem, quanto por atividades antropogênicas. Para fins comparativos e de referência, a tabela 03 apresenta as concentrações médias de elementos-traço em alguns compartimentos terrestres.

Tabela 03. Concentrações de alguns elementos-traço na crosta terrestre, solos do mundo, solos do Brasil e solos de cerrado ($\mu\text{g.g}^{-1}$).

Elemento-traço	Crosta terrestre	Solos do mundo	Solos do Brasil	Solos de Cerrado
Cd	0,1 ^a	-	-	-
Co	20 ^a	1,4 - 27 (10) ^b	15,41 \pm 19,63 ^c	5 \pm 6 ^e
Cr	100 ^a	12 - 221 (67) ^b	56,30 \pm 53,09 ^c	112 \pm 69 ^e
Cu	50 ^a	6 - 80 (24) ^b	49,41 \pm 59,53 ^c	33 \pm 55 ^e
Zn	75 ^a	17 - 236 (67) ^b	24,41 \pm 23,98 ^c	38 \pm 54 ^e
Mn	950 ^a	80 - 1.315 (558) ^b	432,47 \pm 545,26 ^c	455 \pm 583 ^e
Pb	14 ^a	8 - 67 (29) ^b	10,68 \pm 9,98 ^c	26 \pm 120 ^e
Hg	0,05 ^a	-	0,11 \pm 0,09 ^d	-

Fonte: ^a Valores da crosta terrestre (expressos como médias) e ^b solos do mundo (expressos como mínimo-máximo (média)) compilados de Kabata-Pendias & Pendias (2001); ^c solos do Brasil (expressos como média \pm desvio padrão) compilado de Pérez *et al.* (1997); ^d Hg em solos do Baixo rio Madeira (expresso como média \pm desvio padrão) compilado de Bastos *et al.* (2006); e ^e solos do cerrado brasileiro compilado de Marques *et al.* (2004).

Os processos naturais que contribuem para a presença de elementos-traço em solos e águas são o intemperismo das rochas e o escoamento superficial da água das chuvas após lavagem e lixiviamento de elementos associados aos perfis dos solos da região. Portanto, a constituição geológica de uma região tem grande importância na composição geoquímica dos solos e das águas que drenam íons metálicos e pequenas partículas dos solos, formando os sedimentos em suspensão e conseqüentemente os sedimentos de fundo dos rios e lagos (LICHT & PLAWIAK, 2005).

As principais fontes antropogênicas de contaminação dos solos com elementos-traço são: extração mineral (carvão e jazidas minerais); descarte de produtos industriais, comerciais e municipais; e a precipitação atmosférica de gases, cinzas ou pequenas partículas ricas em metais adsorvidos, provenientes de queimadas florestais, indústrias e incineradoras (NRIAGU & PACYNA, 1988) (tabela 04). Insumos agrícolas ou subprodutos usados com finalidade corretiva ou nutricional na agricultura (fertilizantes, calcários, esterco e lodos de esgoto) também representam uma possível fonte de contaminação dos solos com elementos-traço (AMARAL-SOBRINHO *et al.*, 1992).

Tabela 04. Adições globais de alguns elementos-traço ao solo (10^6 Kg ano⁻¹).

FONTE	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Pb	Zn
Resíduos agrícolas	0-3,0	4,5-90	3-38	0-1,5	15-112	1,5-27	12-150
Resíduos animais	0,2-1,2	10-60	14-80	0-0,2	50-140	3,2-20	150-320
Resíduos de madeira	0-2,2	2,2-18	3,3-52	0-2,2	18-104	6,6-8,2	13-65
Resíduos urbanos	0,88-7,5	6,6-33	13-40	0-0,26	7-42	18-62	22-97
Lodo de esgoto municipal	0,02-0,34	1,4-11	4,9-21	0,01-0,8	4,4-11	2,8-9,7	18-57
Resíduos orgânicos diversos	0-0,01	0,01-0,48	0,04-0,61	–	0,08-0,63	0,02-1,6	0,13-2,1
Resíduos de manufat. de metais	0-0,08	0,65-2,4	0,95-7,6	0-0,08	0,41-4,9	4,1-11	2,7-19
Cinzas de queima de carvão	1,5-13	149-446	93-335	0,37-4,8	498-1655	45-242	112-484
Fertilizantes	0,03-0,25	0,03-0,38	0,05-0,58	–	0,13-0,83	0,42-2,3	0,26-1,1
Turfa (fins agrícolas ou combustível)	0-0,11	0,04-0,19	0,15-2	0-0,02	5,2-17	0,45-2,6	0,15-3,5
Descarte de prod. Comerciais	0,78-1,6	305-610	395-790	0,55-0,82	100-500	195-390	310-620
Deposição atmosférica	2,2-8,4	5,1-38	14-36	0,63-4,3	7,4-46	202-263	49-135
Total (média)	5,6-38 (22)	484-1309 (896)	541-1367 (954)	1,6-15 (8,3)	706-2633 (1670)	479-1113 (796)	689-2054 (1372)

Fonte: Adaptado de Nriagu & Pacyna (1988).

Os solos possuem características únicas quando comparados aos outros componentes da biosfera (ar, água e biota), pois se apresentam não apenas como um dreno para contaminantes, mas também como um tampão natural que controla o transporte de elementos químicos e outras substâncias para a atmosfera, hidrosfera e biota (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

As reações que controlam a disponibilidade de elementos-traço em solos compreendem *adsorção e dessorção, precipitação e dissolução, complexação e oxi-redução*. A figura 01 ilustra resumidamente os processos que governam a solubilidade, disponibilidade e mobilidade de elementos químicos no solo.

Esses processos sofrem influência de diferentes atributos dos solos, destacando-se pH, temperatura, potencial redox, textura, composição mineral, capacidade de troca de cátions (CTC), competição por sítios de adsorção, quelatação, teor e qualidade dos compostos orgânicos na fase sólida e na solução do solo, além das propriedades específicas de cada metal (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001). Pois, além de afetarem diretamente as reações

supracitadas, são também os principais fatores que controlam a especiação de elementos-traço em solução.

A concentração de elementos-traço na solução da maioria dos solos é muito pequena, normalmente na faixa de 1 a 1000 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (partes por bilhão), não sendo raros os casos em que estes teores são menores que 1 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Nestas condições, esses elementos tendem a ser retidos no solo via *adsorção*, principalmente na forma não trocável (McBRIDE, 1994).

Não obstante deve-se fazer referência às variações das diferentes propriedades do solo em curtas distâncias, submetendo os teores naturais de elementos-traço à inerente variabilidade espacial do solo.

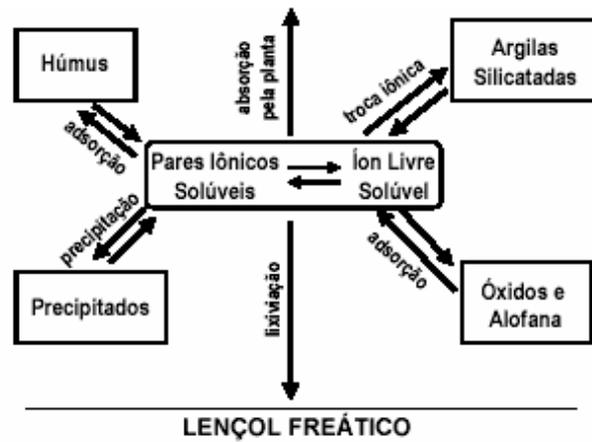


Figura 01. Processos dinâmicos interativos que governam a solubilidade, disponibilidade e mobilidade de elementos-traço nos solos. Compilado de McBride (1994).

1.2. ESTUDOS DE ELEMENTOS-TRAÇO EM SOLOS DO BRASIL

Os estudos referentes a elementos-traços nos solos brasileiros seguiram a mesma tendência ideológica dos trabalhos internacionais, ou seja, antes dos anos 80 enfocava-se a pesquisa de técnicas analíticas, a nutrição mineral de plantas e a gênese dos solos, sendo a poluição ambiental pouco enfatizada (GUILHERME *et al.*, 2005). A partir da década de 90, com o aumento dos problemas ambientais decorrentes da contaminação por elementos-traço, os governos e pesquisadores despertaram para os riscos que estes podem representar para o meio ambiente e conseqüentemente para a saúde da população. Aumentando-se assim o número de pesquisas, congressos, simpósios e reuniões realizadas acerca do tema “contaminação dos solos por elementos-traços”. Devido a essa tendência, a maioria dos estudos brasileiros, foram realizados em locais contaminados antropicamente, geralmente devido à exploração mineral (LACERDA *et al.*, 1987; MARTINELLI *et al.*, 1988; PFEIFFER & LACERDA, 1988; PFEIFFER *et al.*, 1989; MALM *et al.*, 1991; MAURICE-BOURGOIN

et al., 2000; BONOTTO & SILVEIRA, 2003 e BASTOS & LACERDA, 2004), à agricultura (RAMALHO *et al.*, 2000; FERNANDES *et al.*, 2007), ou áreas urbanas (MOURA *et al.*, 2006).

No Brasil, já foram realizados alguns levantamentos dos teores de elementos-traço em solos pouco ou não perturbados antropicamente (PÉREZ *et al.*, 1997; FADIGAS *et al.*, 2002; CAMPOS *et al.*, 2003; FADIGAS *et al.*, 2006; LICHT & PLAWIAK, 2005). Entretanto, são escassos os trabalhos que definam os níveis referenciais de elementos-traço para serem usados como base numa possível avaliação de contaminação ambiental.

Como legislação normativa no Brasil, existe apenas uma Decisão de Diretoria nº. 195/2005-E, de 23/11/2005 da CETESB que aprovou valores orientadores para 84 substâncias em solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. Esta decisão apresenta: Valores de Referência de Qualidade (VRQ), que refletem a concentração natural média dos elementos, indicando situações de não contaminação; Valores de Prevenção (VP), que indicam uma possível alteração prejudicial à qualidade dos solos, sendo utilizado em caráter preventivo; e Valores de Intervenção (VI), que indicam o limite de contaminação acima do qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana (tabela 05).

Tabela 05. Valores orientadores para elementos-traço ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) em solos de São Paulo.

<i>Elemento</i>	<i>VRQ</i>	<i>VP</i>	<i>VI</i>		
			<i>Agrícola</i>	<i>Residencial</i>	<i>Industrial</i>
Cd	<0,5	1,3	3	8	20
Pb	17	72	180	300	900
Cu	35	60	200	400	600
Cr	40	75	150	300	400
Co	13	25	35	54	90
Zn	60	300	450	1.000	2.000
Hg	0,05	0,5	12	36	70

Fonte: CETESB, 2005.

Neste contexto, cita-se também o trabalho de Fadigas *et al.* (2006), o qual apresenta uma proposta de valores de referência para elementos-traço nos solos brasileiros, especialmente argissolos e latossolos. Além de um modelo para obtenção dos teores considerados normais de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em solos, a partir dos teores de silte, argila, Mn, Fe e a CTC. Pois, os autores identificaram sete grupos de amostras obtidos por semelhanças estatísticas, que se compõem de solos das distintas classes pedológicas brasileiras. Como valores considerados normais em solos não poluídos, propostos por Fadigas

et al. (2006) para uso como valores de referência (em $\mu\text{g.g}^{-1}$) temos: 6.500,0 a 72.700,0 de Fe; 40,7 a 522,3 de Mn; 2,0 a 119,0 de Cu; 6,0 a 79,0 de Zn; 2,0 a 20,0 de Co; 19,0 a 65,0 de Cr; 0,3 a 1,6 de Cd; e 3,0 a 40,0 de Pb.

Segundo Campos *et al.* (2003), as concentrações de elementos-traço encontradas em seu trabalho (tabela 03), também podem ser usadas como referência em linhas de base para solos brasileiros da classe pedológica latossolos.

Através dos estudos já realizados verifica-se que os teores de elementos-traço apresentam relações intrínsecas com alguns atributos do solo (PÉREZ *et al.*, 1997; FADIGAS *et al.*, 2002; VENDRAME *et al.*, 2007).

Pérez *et al.* (1997) encontraram correlações significativas entre Fe e os demais elementos, e entre estes e os teores de argila (exceto o Mn). Indicando uma forte associação entre os teores de elementos-traço e o material de origem dos solos. As concentrações de elementos-traço encontradas por estes autores nos 15 horizontes diagnósticos superficiais (A) e subsuperficiais (B) de solos brasileiros estão dispostos na tabela 06.

Fadigas *et al.* (2002) também encontraram correlações positivas entre as variáveis argila, silte, Mn, Fe e as concentrações de elementos-traço. Segundo estes autores, os intervalos de concentração encontrados (tabela 06), podem ser considerados como teores que os solos contêm em condições naturais, e oferecem uma indicação para avaliar preliminarmente áreas com suspeita de contaminação, cujos solos possuam características similares às do estudo.

Tabela 06. Concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$) encontrados em solos do Brasil.

<i>Elemento</i>	<i>Pérez et al. (1997)</i>	<i>Fadigas et al. (2002)</i>	<i>Vendrame et al. (2007)</i>	<i>Fernandes et al. (2007)</i>
Cd	-	0,2 - 1,8 ^a	-	1,82 - 16,22 ^a
Pb	0,52 - 36,55 ^a	-	-	0 - 36,12 ^a
Cu	2,15 - 165,07 ^a	1,6 - 14,3 ^a	28,76 e 0,97 ^b	0 - 118,75 ^a
Cr	7,46 - 148,54 ^a	9,6 - 75 ^a	-	13,47 - 411,6 ^{a5}
Co	0,30 - 54,79 ^a	1,7 - 9,6 ^a	-	-
Zn	0,32 - 63,02 ^a	5,4 - 37,8 ^a	36,01 e 0,83 ^b	8,33 - 275,41 ^a
Mn	0,87 - 1.732 ^a	57 - 394 ^a	151 e 5,47 ^b	70 - 1.756 ^a
Fe	100 - 76.800 ^a	5.900 - 62.3 ^{a80}	66.690 e 29,67 ^b	19.709 - 929.143 ^a

^a Valores expressos como teores mínimo - máximo; ^b Valores expressos como teores totais e disponíveis.

Vendrame *et al.* (2007) avaliou a disponibilidade de Cu, Zn, Mn e Fe em solos sob pastagens do cerrado brasileiro. Os teores totais e disponíveis encontrados por estes autores estão dispostos na tabela 06. Como conclusão, os autores colocam que a disponibilidade destes elementos nos solos de cerrado está relacionada principalmente com os óxidos de Fe cristalinos e com o pH em água. E a disponibilidade de Zn esta mais relacionada com a capacidade de troca catiônica do solo.

Os elementos-traços fazem parte dos componentes ativos de vários agrotóxicos e fertilizantes, o que tem elevado os níveis de contaminação dos solos agricultáveis (AMARAL-SOBRINHO *et al.*, 1992). Porém, alguns trabalhos têm demonstrado que, embora algumas amostras exibam teores totais mais expressivos, ocorre geralmente uma baixa disponibilidade para esses elementos serem absorvidos pelas plantas e conseqüentemente trazer maiores implicações diretas ou indiretas para a saúde da população.

Este comportamento de baixa disponibilidade é constatado no trabalho de Ramalho *et al.* (2000), o qual avaliou a contaminação por elementos-traço em solos, sedimentos, água e plantas na microbacia de Caetés-RJ, decorrente do uso de agroquímicos. O mesmo se observa em Fernandes *et al.* (2007), aonde se encontra a concentração de elementos-traço em solos agrícolas com cultivo de olerícolas no estado de Minas Gerais (tabela 06).

1.3. ESTUDOS DE ELEMENTOS-TRAÇO NO RIO MADEIRA

O depósito de ouro em exploração no Alto rio Madeira localiza-se próximo a fronteira do Brasil com a Bolívia, no Estado de Rondônia, numa região autorizada e delimitada por portarias do Ministério de Minas e Energia (N^{os}. 1345 de 1979 e 1034 de 1980) e denominada Reserva Garimpeira do rio Madeira, ocupando uma área de 192 Km² ao longo do rio Madeira, no trecho compreendido entre as cachoeiras do Paredão (Guajará-Mirim) e Teotônio (Porto Velho).

A produção oficial de ouro, segundo a Secretaria da Receita Federal de Rondônia, no período entre 1979 e 1995 foi de 51,5t, após essa data não se tem registro oficial (figura 02). A perda de Hg para os corpos d'água nesse período chegou a atingir de 40 a 45% do total utilizado, sendo o rio Madeira um dos ambientes mais atingidos pela contaminação. A fração do Hg que não atingiu diretamente os corpos d'água sublimou para a atmosfera na ordem 55 a 60% (PFEIFFER & LACERDA, 1988). Baseado nesses cálculos, Pfeiffer & Lacerda (1988) estimaram que cerca de 68t de Hg foram lançadas para o meio ambiente da região, apenas considerando o período citado e a produção oficial. Segundo estimativas esse despejo

ultrapassou as 90t nesse período, considerando as estimativas de extrações de ouro não registradas.

Uma vez que a deposição da maior parte do Hg atmosférico originado em garimpos na Amazônia ocorre entre 40 e 60 Km da fonte emissora (LACERDA *et al.*, 2004), é provável que a maior parte do Hg perdido para a atmosfera na região do Alto rio Madeira, principalmente durante o auge do garimpo (décadas de 70 e 80), tenha sido depositado nos solos marginais, o qual está sujeito a remobilização quando da alteração no uso destes solos (BASTOS & LACERDA, 2004). Esta influência no uso do solo é demonstrada por Lacerda *et al.* (2004) que diagnosticou significativa diferença entre as concentrações de Hg em solos de floresta ($0,0619 \pm 0,050 \mu\text{g.g}^{-1}$) e em solos de pastagem ($0,0338 \pm 0,014 \mu\text{g.g}^{-1}$) no estado de Mato Grosso.

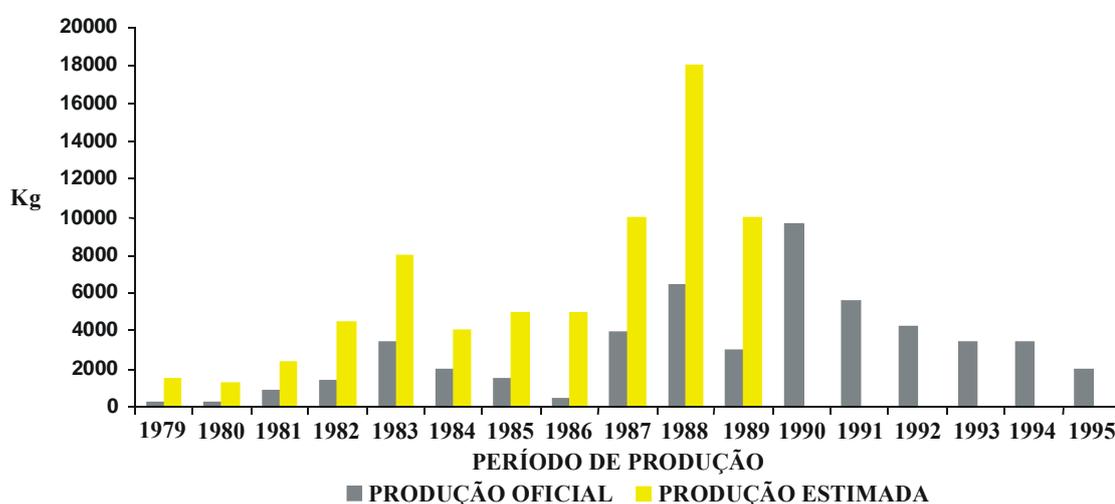


Figura 02. Produção oficial e estimada de ouro no rio Madeira (BASTOS, 2004).

Estudos referentes à concentração de Hg em solos de floresta no Alto rio Madeira, principalmente nas áreas de intensa atividade garimpeira, foram realizados por Lacerda *et al.* (1987), que encontrou uma alta variação nas concentrações, com valores entre $0,035$ e $0,300 \mu\text{g.g}^{-1}$. Posteriormente, nos estudos de Malm *et al.* (1991) também em solos de florestas da região, com alguns pontos distantes das áreas de garimpo, observou-se valores semelhantes, variando de $0,030$ a $0,340 \mu\text{g.g}^{-1}$. As concentrações mais elevadas de Hg, encontradas neste estudo, são associadas à deposição de Hg atmosférico proveniente da queima do amálgama Au-Hg nas áreas de garimpo próximos.

No entanto, estudos recentes constataram que a atividade garimpeira não é a única fonte de Hg na região Amazônica. Segundo os estudos de Roulet *et al.* (1998) os solos da região do rio Tapajós, que não possuem histórico de garimpo, apresentam teores de Hg

variando entre 0,090 – 0,210 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Valores estes relativamente altos quando comparados com as médias mundiais. Postula-se então que os solos da região Amazônica sejam naturalmente enriquecidos por este elemento, de forma que o processo de desmatamento seguido da queima de vegetação tem sido apontado como um fator que influencia na liberação do Hg contido nos solos orgânicos, húmus (matéria orgânica), e na biomassa florestal. Estas práticas aumentam também a lixiviação e erosão superficial dos solos desprotegidos, causando o aumento das taxas de sedimentação nos rios e, conseqüentemente acelerando o transporte de Hg para o ambiente aquático (BASTOS & LACERDA, 2004).

Contudo, Wasserman *et al.* (2001) ao analisarem o ciclo do Hg no ambiente amazônico, alerta para a pouca representatividade das amostras de Hg total em solos nos estudos até então realizados, as quais teriam sido obtidas de forma pontual e cujas conclusões foram estendidas para toda a região.

No contexto de mineração de ouro também pode ter ocorrido à disponibilidade de outros elementos como Pb, Cr, Cu, Zn, Fe, presentes em soldas, chapas metálicas, tintas (usadas até hoje na pintura dos cascos das embarcações), entre outros produtos utilizados na fabricação de balsas, dragas e demais embarcações do garimpo. Além disso, têm-se a concentração desses elementos-traço devido ao processo gravimétrico utilizado pelos garimpeiros, durante a pré-concentração dos metais pesados na busca do ouro.

Entre os estudos de elementos-traço na Bacia do rio Madeira, a maior parte foi realizada em águas, sedimentos em suspensão e sedimentos de fundo de rios e lagos. Conforme se observa em Lacerda *et al.* (1990) que avaliaram as diferenças nos teores de elementos-traço em sedimentos de rios de águas pretas, claras e brancas.

Na região do Baixo rio Madeira e afluentes, cita-se o trabalho realizado por Gomes *et al.*, (2003a) aonde se encontra o levantamento das concentrações de elementos-traço em água total, água dissolvida, sedimentos em suspensão e macrófitas aquáticas. Gomes *et al.* (2003b) também avaliaram a presença de alguns elementos-traço em lagos de várzea do rio Madeira. Ambos os estudos encontraram concentrações em água total abaixo dos valores máximos permissíveis para consumo humano, indicados pelo CONAMA e Fundação Nacional da Saúde, com exceção de Fe e Mn, que estão relacionados com a formação geológica da região que é composta por solos ricos nesses metais. Também contataram que devido às características físico-químicas d'água e a pequena contribuição antrópica, os elementos apresentam-se na maioria da carga total adsorvidos ao material particulado em suspensão.

Entre os estudos realizados no Alto rio Madeira pode-se citar Gomes *et al.* (2004), que apresenta as concentrações de elementos-traço na água, sedimentos em suspensão, solos

(tabela 07), sedimentos de fundo e macrófitas aquáticas. Segundo os autores, a área amostral apresenta de forma geral concentrações de elementos-traço (exceto Hg) em níveis naturais quando comparado a valores de áreas contaminadas. As maiores concentrações encontradas foram de Fe e Mn, que se devem aos tipos de solos da bacia de drenagem, onde prevalece a classe dos latossolos.

Bonotto & Silveira (2003), em estudo sobre o transporte de Hg e outros elementos no rio Madeira, apresentam concentrações de elementos-traço tanto em sedimento de fundo quanto em sedimentos em suspensão (tabela 07). Estes autores utilizaram um método de extração total (com ácido fluorídrico) dos elementos-traços presentes nas partículas. Demonstrando que na componente cristalina das partículas de sedimentos existem elevadas concentrações de elementos-traço não biodisponíveis. Concluíram também que o Hg é preferencialmente transportado por sedimentos compostos por kaolinita, mica, feldspato, óxidos e hidróxidos de Fe, que são constituintes dos solos regionais.

Gomes *et al.* (2009), avaliaram a relação entre os sedimentos em suspensão e as concentrações de elementos-traço em dois períodos sazonais (vazante e cheia) através da análise de componentes principais - ACP. As concentrações médias de elementos-traço encontradas em cada período estão na tabela 07. Através deste estudo foi possível observar as diferentes influências sazonais e a importância de alguns fatores como a influência de solos marginais, atividades agropastoris de uso do solo, áreas de várzea inundadas e dos tributários para a alteração pontual e não-pontual das características geoquímicas dos sedimentos em suspensão no Alto rio Madeira.

Tabela 07. Concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) encontradas em solos, sedimentos de fundo e sedimentos em suspensão do Alto rio Madeira.

<i>Elemento</i>	Gomes <i>et al.</i> (2004)	Bonotto & Silveira (2003)		Gomes <i>et al.</i> (2009)	
	<i>Solos</i>	<i>Sed. em Suspensão</i>	<i>Sed. de Fundo</i>	<i>Sed. em Suspensão Vazante</i>	<i>Sed. em Suspensão Cheia</i>
Pb	2,5 - 11,8 ^a	712 ^b	169 ^b	10,9 ^b	14,4 ^b
Cu	1,81 - 7,53 ^a	593 ^b	636 ^b	21,6 ^b	19,6 ^b
Cr	5,61 - 11,03 ^a	-	5 ^b	17,2 ^b	17,6 ^b
Co	0,7 - 5,54 ^a	-	-	9,1 ^b	8,7 ^b
Zn	7,94 - 53,52 ^a	723 ^b	421 ^b	47,4 ^b	88,1 ^b
Mn	36,27 - 393,47 ^a	1.217 ^b	582 ^b	454,2 ^b	423 ^b
Fe	6.649- 20.014 ^a	75.776 ^b	38.101 ^b	35.304 ^b	35.775 ^b

^a Valores expressos em teores mínimo - máximo; ^b Valores expressos em teores médios.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Avaliar as concentrações dos elementos-traço: Cd, Cu, Cr, Co, Pb, Zn, Mn, Fe e Hg em solos do Alto rio Madeira.

2.2. ESPECÍFICOS

➤ Quantificar as concentrações dos elementos-traço Cd, Cu, Cr, Co, Pb, Zn, Mn, Fe e Hg nos solos do Alto rio Madeira.

➤ Comparar as concentrações dos elementos-traço da área em estudo com as concentrações referenciais encontradas na literatura.

➤ Analisar o comportamento dos elementos-traço nos solos da área em estudo através de análise estatística multivariada e técnicas de geoprocessamento.

➤ Contribuir, com as informações construídas no desenvolvimento do projeto, para o banco georreferenciado de dados geoquímicos do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental - UNIR sobre os poluentes metálicos na Bacia do rio Madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. Clima

A área de estudo pode ser definida como zona sub-climática regional *Am*, onde predominam altas temperaturas durante todo o ano, com pequena amplitude térmica anual e notável amplitude térmica diária, especialmente no inverno. Apresenta chuvas abundantes, com forte decréscimo de precipitação no inverno, com três meses de seca (junho, julho e agosto) bem definidos. Esses fenômenos correspondem a um clima que, de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Tropical quente e úmido (RONDÔNIA, 2002).

A precipitação anual varia de 1.800 a 2.400 mm, mantendo uma umidade atmosférica média de 82% ao ano. O período sazonal é marcado por duas estações, uma chuvosa com duração de 8 a 9 meses de precipitação (setembro a abril) e outra de estiagem com pouca ocorrência de precipitação e duração de 3 a 4 meses (junho a agosto). As temperaturas médias anuais variam entre 24° e 26° C, podendo as máximas oscilar entre 28° e 33° C, e as mínimas chegar a 18° e 21° C nas regiões de maior altitude (SEDAM, 2002).

3.1.2. Hidrografia

A rede hidrográfica de Rondônia encontra-se quase toda inserida na Sub-bacia do rio Madeira, que é o principal afluente da margem direita da Bacia do rio Amazonas. A Sub-bacia formada pelo rio Madeira e seus afluentes drena uma área de aproximadamente 1.420.000 Km², e possui aproximadamente 1.459 Km de extensão percorrendo os estados de Rondônia e Amazonas, com vazão média de 23.000m³/s. A sua formação se dá na confluência dos rios Mamoré e Beni (originários dos planaltos andinos), na localidade de Vila Murtinho no município de Nova Mamoré-RO, e sua foz no rio Amazonas próximo ao município de Itacoatiara-AM (SEDAM, 2002).

O rio Madeira apresenta dois trechos distintos em seu curso, denominados Alto e Baixo Madeira. A área de estudo encontra-se no primeiro trecho, denominado Alto rio Madeira, e se estende desde a sua formação até as proximidades de Porto Velho-RO, totalizando cerca de 360 Km de extensão (figura 03). Este trecho não apresenta condições de navegabilidade a embarcações grandes devido à grande quantidade de cachoeiras existentes,

cerca de 18, além do desnível de aproximadamente 72 m e declividade da ordem de 20 cm a cada quilômetro. Dentre as principais corredeiras e cachoeiras podem-se citar as seguintes: Riberão, Jirau, Caldeirão do Inferno, Morrinhos, Misericórdia, Teotônio e Santo Antônio.

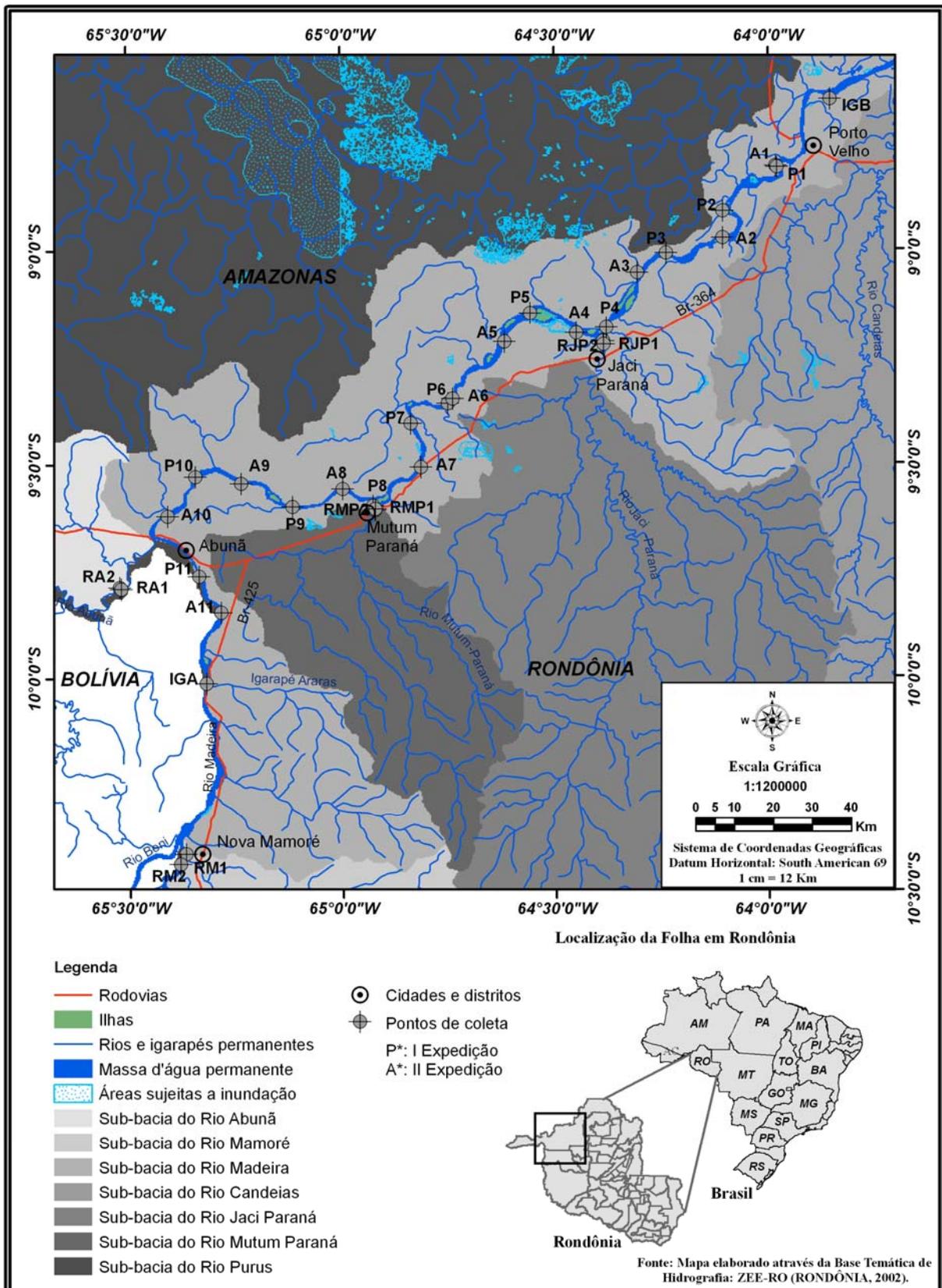


Figura 03. Mapa das sub-bacias hidrográficas na área em estudo.

A Sub-bacia do rio Madeira é formada por oito bacias significativas: Bacia do Mamoré, Bacia do Abunã, Bacia do Mutum-Paraná, Bacia do Jaci-Paraná, Bacia do Candeias, Bacia do Machado e Bacia do Aripuanã. Segundo a SEDAM (2002), na área estudada em relação à extensão e/ou volume d'água destacam-se quatro sub-bacias:

1. Bacia do rio Mutum-Paraná: ocupa superfície de 8.840 Km², servindo principalmente como via de acesso para o interior.

2. Bacia do rio Abunã: possui área de abrangência de aproximadamente 4.600 Km², sendo responsável pela linha fronteira entre Brasil e Bolívia no extremo oeste do estado.

3. Bacia do rio Jaci-Paraná: estende-se por 12.000 Km², sendo utilizada principalmente como via de acesso para o interior.

4. Bacia do rio Mamoré: ocupa uma área de 30.000 Km² dentro do estado de Rondônia, formando a linha fronteira do Brasil com a Bolívia.

A rede de drenagem do rio Madeira apresenta trechos de embasamento meandrante e sedimentar, estando localizada na Plataforma ou Cráton Amazônico, região que permaneceu estável durante a evolução das faixas de dobramentos Paraguai e Uruguai. Assim o regime hidrográfico do rio Madeira recebe grande influência do relevo do estado que é pouco acidentado, não apresentando grandes elevações ou depressões, com variações de altitudes que vão de 70 metros a 500 metros. A região norte e noroeste, pertencente à grande Planície Amazônica, apresenta área de terras baixas e sedimentares. As áreas mais acidentadas encontram-se localizado na região sul, onde ocorrem elevações e depressões, com altitudes que chegam a alcançar 800 metros na Serra dos Pacaás Novos, que se dirige de noroeste para sudeste do estado e é o divisor entre a bacia do rio Guaporé e as bacias dos afluentes do rio Madeira (Jaci-Paraná, Candeias e Jamari) (SEDAM, 2002).

3.1.3. Geologia

O estado de Rondônia está inserido no domínio do embasamento cratônico antigo pertencente à Província do Tapajós, Sub-Província do Madeira, que localmente recebe a denominação de Complexo Jamari. A geologia da região é caracterizada pelo embasamento originário dos complexos gnáissicos, granitóides e supracrustais associados, por sua vez retrabalhados por rochas intrusivas, com destaque para as graníticas, e encoberta por seqüências sedimentares, com ou sem vulcânicas associadas que datam do Proterozóico Médio e Superior (RONDÔNIA, 2002).

Os estudos geológicos da 2ª Aproximação do Zoneamento Ecológico de Rondônia apresentam as informações geológicas mais detalhadas de Rondônia. Com base nesses estudos foi elaborado um mapa com as principais unidades geológicas que ocorrem na área de estudo (figura 04). Destas, as mais representativas e importantes são:

- **Qpt (Terraços fluviais Pleistocênicos)** – em paleocanais e relíquias de planícies aluviais (sistemas de megafans, pedimentos e *wash-out*), no topo de colinas (ou outros altos topográficos), compostos de material pobremente selecionado, compreendendo fragmentos de laterita, areia e argila depositados acima do nível médio dos cursos d'água atuais;

- **Qpa (Sedimentos fluviais em canais Pleistocênicos)** - freqüentemente abandonados na superfície ou em paleocanais soterrados. Possuem materiais detríticos mal selecionados, compostos por areia, silte e argila, com níveis conglomeráticos;

- **Qha (Depósitos aluvionares em canais fluviais e planícies de inundação dos sistemas de drenagens atuais)** – apresenta materiais detríticos mal selecionados, compostos de sedimentos arenosos, siltosos e argilosos, com horizontes conglomeráticos. Geralmente misturados com materiais coluvionares do Holoceno;

- **TQi (Coberturas quaternárias-neogênicas indiferenciadas)** - associada com leques e canais fluviais, planícies de inundação e depósitos de lagos. Constituída de sedimentos de tamanho variado, desde laterita a argila, com lateritização significativa. As rochas geralmente têm uma idade Neogênica (Plioceno-Mioceno), podendo incorporar materiais do Quaternário;

- **PMPja (Supergrupo Gnaiss-Migmatito Jarú)** - constituído por ortognaisses de origem granítica, granodiorítica, tonalítica, charnoquítica, enderbítica e charno-enderbítica. Os pargnaisses incluem biotita-gnaisses, kinzigitos, rochas calcissilicatadas, anfíbolitos, granulitos máficos e migmatitos anatexíticos. Retrabalhados no Proterozóico Médio;

- **NPps (Grupo Palmeiral - São Lourenço)** - composto por ortoquartzitos esbranquiçados, arenitos arcóianos de estratificação cruzada, arcósio e conglomerados;

- **MPmr (Grupo Meta-Vulcano-Sedimentar Mutum-Paraná-Roosevelt)** – constituída por uma seqüência dobrada, porém essencialmente não-metamórfica a epimetamórfica, composta de arenito, argilito, *chert*, arenito hematítico, ardósia, filito, quartzito (micáceo), formação ferrífera, metatufo, gabro e diabásio;

- **MPyrg (Granitos *Rapakivi* Jovens de Rondônia)** – formado por plutões de granitos *sensu stricto*: quartz-sienito, sienogranito, biotita-sienito, biotita-alcalifeldspato-granito e, subordinadamente, monzogranito e alcalifeldspato-granito. As primeiras variedades de *rapakivi* compreendem piterlito, viborgito e, em escala menor, faialita-ferrohastinsita-sienito e ferrohastinsita-biotita-quartz-sienito;

• **MPteg (Suíte Intrusiva Teotônio)** - é constituída de quartzo-alcalifeldspato-granito e fialita-clinopiroxênio-quartzo-alcalifeldspato-sienito, cortados por meladiorito simplutônico.

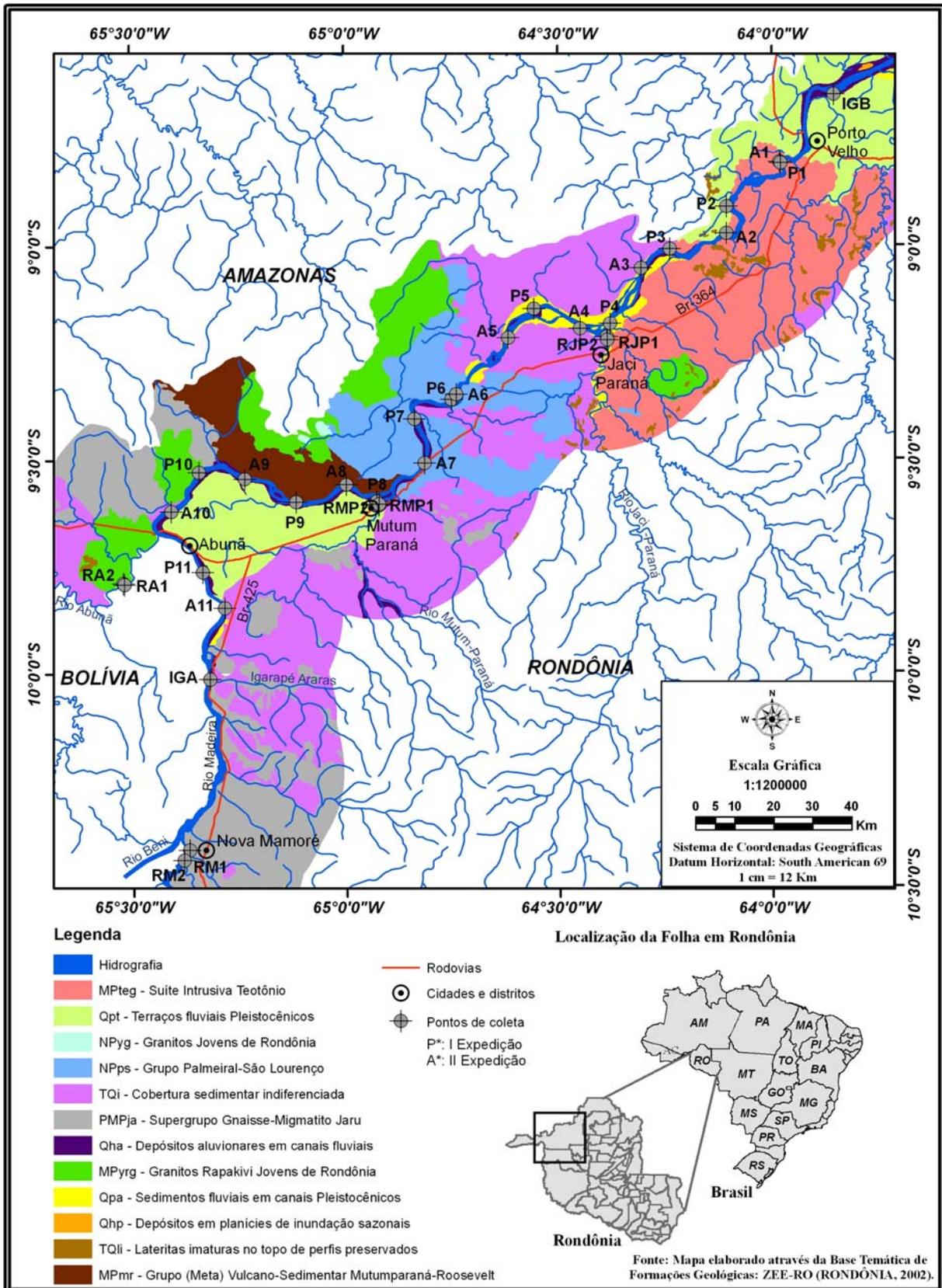


Figura 04. Mapa das unidades geológicas na área em estudo.

3.1.4. Pedologia

Os solos de Rondônia apresentam um elevado nível de complexidade, como é característico da região amazônica, mas que permite concluir que suas características físicas e químicas médias são relativamente satisfatórias. No geral, boa parte do território está coberta por solos de relevo plano, bem drenados, e derivados de materiais relativamente ricos em minerais. Todavia, não se deve menos prezar a ocorrência de zonas com solos quimicamente muito pobres, mal drenados, de relevo abrupto e arenosos, que devem permanecer com sua cobertura vegetal original (RONDÔNIA, 2002). Conforme o ZEE-RO, elaborado na escala 1:250.000, a área de estudo apresenta os seguintes grupos de solos:

- **Areias Quartzosas:** Este grupo de solos não apresenta horizonte diagnóstico. São originários de arenitos ricos em quartzo ou em aluviões ou colúvios transportados. Em geral, os solos apresentam características restritivas tanto físicas quanto químicas: baixa capacidade de retenção de umidade e fertilidade natural muito deficiente. A capacidade de troca catiônica é baixa, apresentando, freqüentemente, reação bastante ácida. Essa unidade ocupa um pouco mais de 5% da superfície do Estado de Rondônia.

- **Cambissolos:** Este grupo de solos se caracteriza pela presença de horizonte “câmbico”, o qual contém uma boa proporção de mineráveis intemperizáveis. São pouco a moderadamente profundos e ocorrem nas encostas das colinas. Desenvolveram-se a partir de rochas ácidas possuindo, em geral, baixa fertilidade e reação ácida. Em função do seu relevo e de suas características físicas são muito suscetíveis à erosão se desprovidos da sua cobertura vegetal. Perto de 10% dos solos do Estado são cambissolos, dos quais os 40% apresentam caráter eutrófico.

- **Latossolos:** O grupo dos latossolos predominam no Estado com cerca de 46%. Os latossolos são solos com horizonte B ôxico e/ou kândico. Geralmente, são solos bastante intemperizados, apresentando, como principais minerais derivados da argila, caolinita, gipisita, minerais amorfos e sesquióxidos de ferro e alumínio. Em razão da forte lixiviação sua capacidade de troca catiônica é baixa, assim como a quantidade de cálcio, magnésio, potássio e sódio adsorvidos. Em geral, solos ricos em sesquióxidos de ferro e alumínio tendem a desenvolver níveis importantes de troca aniônica, refletindo o processo químico natural de reversão da degradação desses solos através da lixiviação. No Brasil existem seis grupos de latossolos conforme o sistema brasileiro, sendo que na área amostral são reconhecidos dois tipos de latossolos: Amarelo e Vermelho-Amarelo.

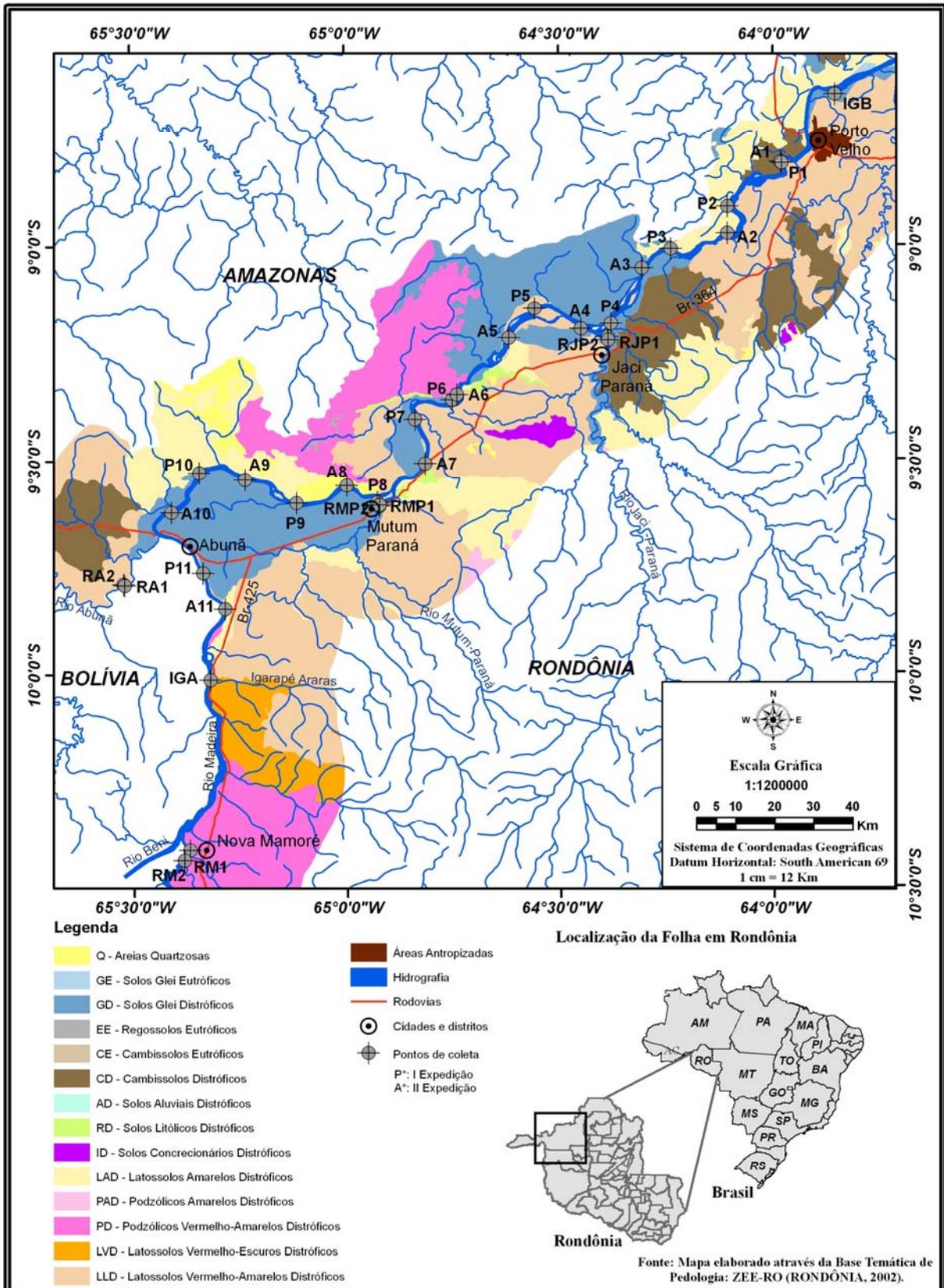


Figura 05. Mapa das classes de solos da área em estudo.

- Os Latossolos Amarelos são os mais frequentes, cobrindo 16,5% do território estadual. Caracterizam-se pelos altos conteúdos de caulinita e hidróxidos de alumínio. A sua drenagem

é, em geral, menos eficiente do que aquela que caracteriza os latossolos vermelhos, apresentando condições de oxigenação deficientes. Do ponto-de-vista da fertilidade, são pobres, bastante ácidos e geralmente distróficos e álicos.

- Os Latossolos Vermelho-Amarelos ocupam uma extensão territorial menor, perfazendo 13,6% da superfície do Estado. Estes solos são geralmente, pobres, ácidos, álicos e distróficos, embora seja possível encontrar áreas com solos de melhores características.

• **Podzólicos:** Na classificação brasileira esse grupo descreve solos com horizonte “B textural”, isto é, com presença de acumulação de argila nesse horizonte. Este grupo ocupa aproximadamente 8,5% da superfície do Estado. Os Podzólicos Vermelho-Amarelos são os mais comuns em Rondônia, perfazendo perto de 6% do estado. Caracterizam-se pelo horizonte B textural argiloso, ácidos, freqüentemente álicos e distróficos, com baixa saturação de bases. O tipo de argila predominante é a caolinita, embora seja comum a ocorrência de óxido e sesquióxidos de ferro e alumínio. Alguns dos solos desta unidade apresentam texturas argilosas, franco-argilosos francas ou areno-argilosas, intermediários entre latossolos e solos plínticos.

• **Gleissolos:** São solos ocorrendo em regiões com excesso de água quer temporal, quer permanente. Isto significa drenagem precária com déficit acentuado de oxigênio, o qual, normalmente, restringe o crescimento vegetal, apesar de existirem espécies adaptadas tais como arroz, juta, algumas palmeiras, pastagem e forrageiras. Mesmo assim, problemas decorrentes do excesso de hidróxido de ferro, conseqüência do estado de quase permanente redução, dificultam o crescimento de espécies tolerantes à inundação. Em Rondônia, muitos desses solos se desenvolveram a partir de depósitos aluviais ao longo dos rios. Além da restrição decorrente do excesso de umidade, apresentam baixa fertilidade, pH baixo e altos níveis de saturação de alumínio. Ocupam aproximadamente 10% do território estadual.

3.1.5. Vegetação

A classificação mais recente e detalhada quanto às formações vegetacionais do estado de Rondônia está baseada nos estudos da 2ª Aproximação do Zoneamento Ecológico Econômico de Rondônia (RONDÔNIA, 2002). Segundo estes estudos, o quadro vegetacional da área de estudo é composto por: florestas ombrófilas, formações pioneiras, formação aluvial de pequeno porte (Umirizal), zonas de contato e savanas parque (campo cerrado) (figura 06). Dentre estas formações a Floresta Ombrófila Aberta Submontana, presente em 115.932 km² ou 48,82% do estado de Rondônia, é a predominante.

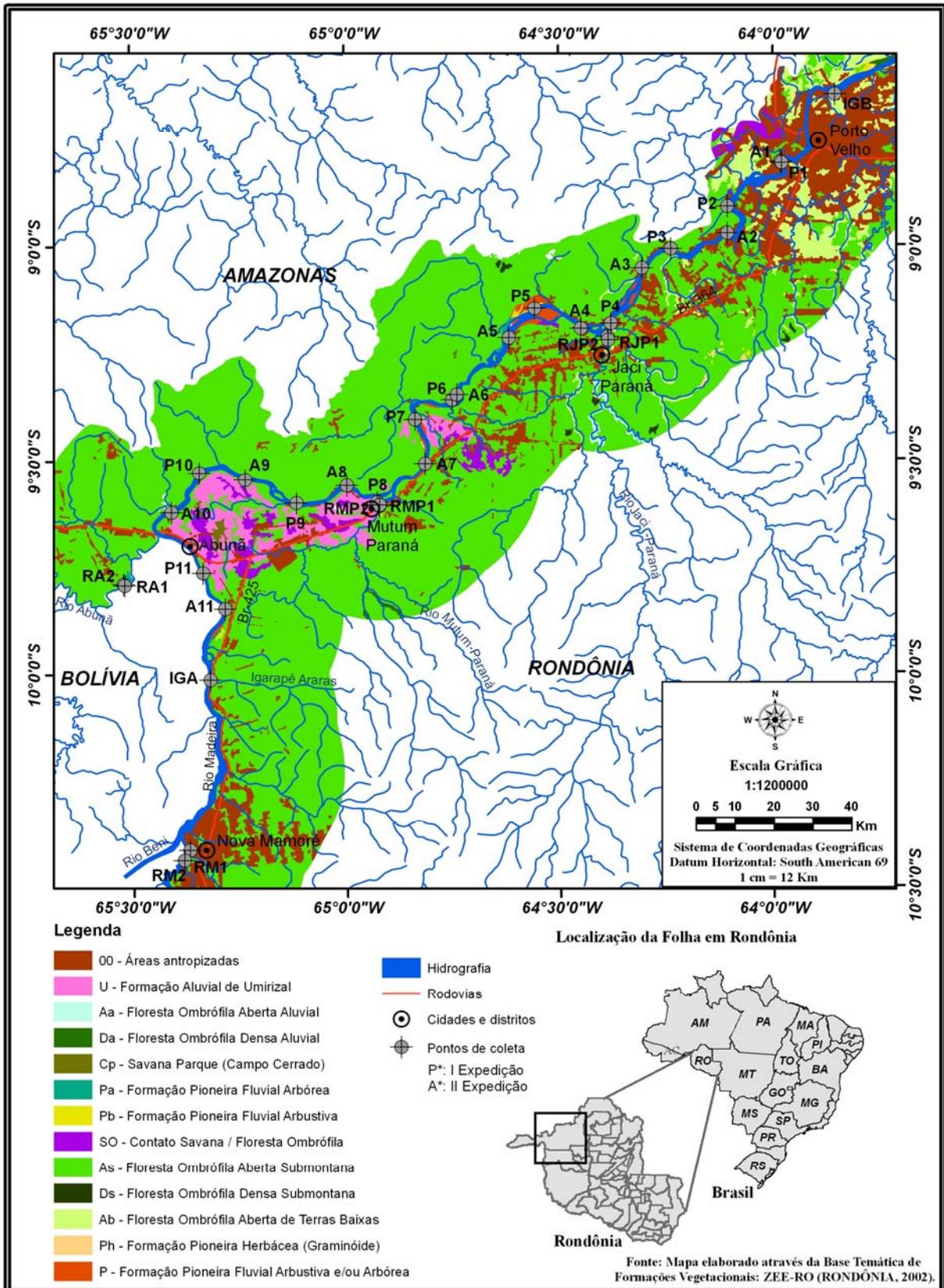


Figura 06. Mapa das formações vegetacionais na área em estudo.

Este tipo de floresta tropical úmida, pluvial e sempre verde, apresenta dossel bem distinto, com indivíduos emergentes e sub-bosque estratificado, permitindo ausência de área

foliar entre 30 e 40 %. Ocorrem principalmente sobre latossolos e solos podzólicos, ou seja, em solos antigos, rasos, fortemente intemperizados, com afloramento de rochas, seixos superficiais e lateritas de idades variadas desde o quaternário (aluviais), predominando no terciário até o pré-cambriano. A topografia é declivosa (até 40°). A paisagem é dominada por vales e ravinas, podendo estar associadas a palmeiras e cipós. Entre as palmeiras, destacam-se o babaçu (*Attalea phalerata*), o coco-cabeçudo (*A. martiana*) e inajá (*A. maripa*). Nos vales profundos, de difícil acesso, nas fontes d'água de rios que nascem nas serras é possível encontrar enclaves de vegetação higrófila com o aparecimento de indivíduos de açaí, sororoca e paxiúba. No dossel ocorrem espécies arbóreas como o cumaru (*Dipteryx odorata*), margonçalo (*Hieronima laxiflora*) e gema-de-ovo (*Poecilanthe effusa*).

Outra formação comum em áreas de aluviões nas bacias dos rios Madeira e Guaporé é o Umirizal. Esta cresce sobre solos pobres, mal drenados e rasos. Geralmente é dominada por uma ou poucas espécies, destacando-se o umiri (*Humiria balsamifera*), *Pera* sp., *Pagamea* sp. e *Qualea* sp. O dossel fica a cerca de 5 a 10 m de altura, com até 15 % de abertura. O sub-bosque é fechado, com pouca visibilidade, dominado por estrato arbustivo onde se destacam espécies de Melastomataceae (*Tococa* sp., *Mayeta guianensis*) além de lianas lenhosas.

3.2. DESENHO AMOSTRAL

A elaboração do desenho amostral para a área em estudo baseou-se em uma amostragem sistemática, com a marcação de pontos de coleta em imagens LANDSAT-TM 7, formando uma malha experimental composta por 22 pontos de amostragem no Alto rio Madeira. Os pontos foram distribuídos em uma malha regular, com intervalos de aproximadamente 12.500m paralelos ao leito do rio (BERNARDI *et al.*, 2001), de forma a abranger a maior parte dos grupos de solos as margens do Alto rio Madeira. Também foram amostrados a aproximadamente 5 a 10 Km da confluência com o rio Madeira, os solos as margens dos principais afluentes: rio Mutum-Paraná, rio Abunã, rio Jaci-Paraná, igarapé Araras e igarapé Belmont. Bem como, o solo do seu rio formador: rio Mamoré (figura 07). A malha experimental foi aferida em campo através da coleta de coordenadas geográficas, obtidas com utilização de receptor de GPS, modelo GARMIN's® 48 Personal Navigator™.

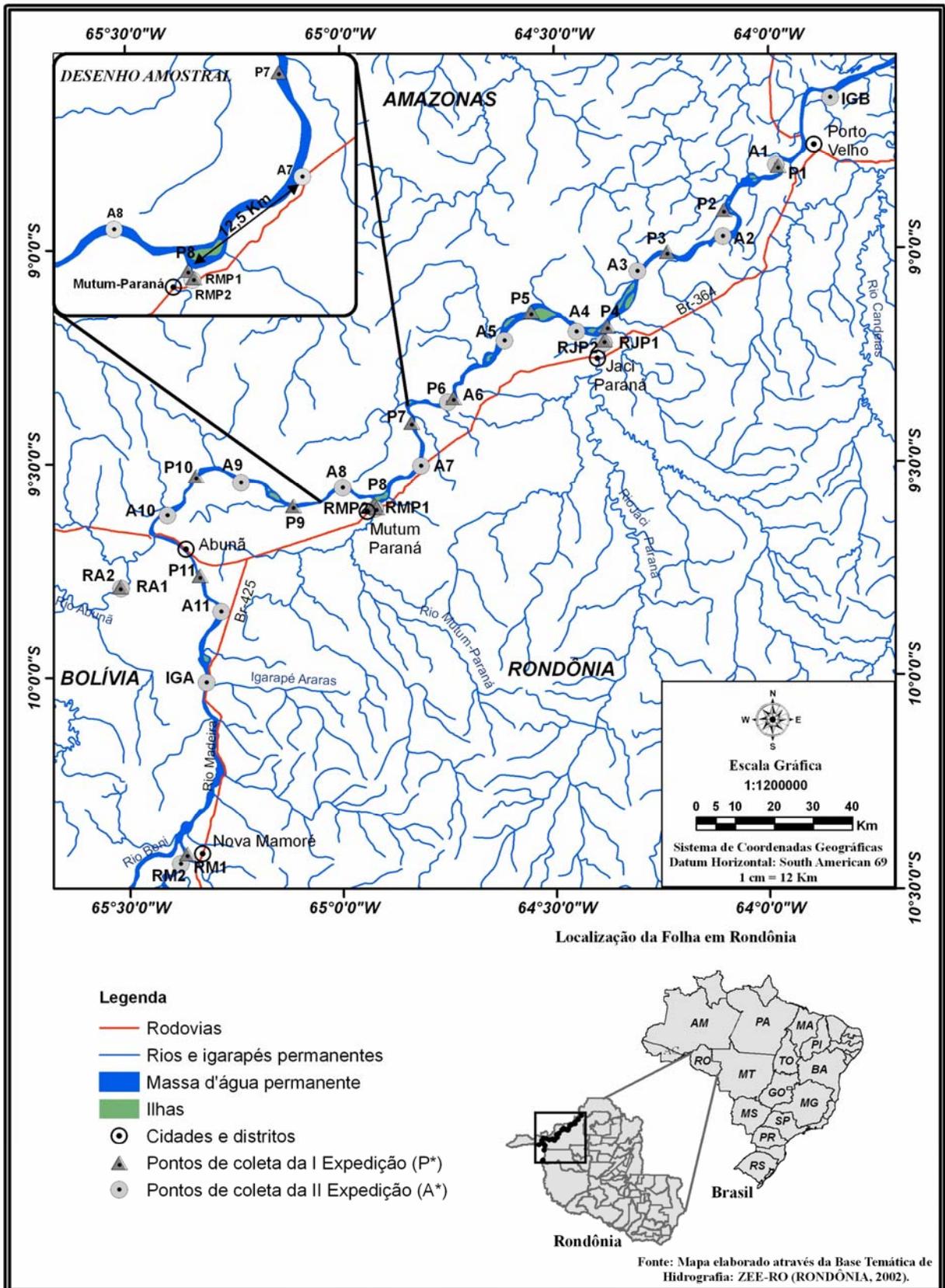


Figura 07. Malha de amostragem geoquímica com a localização dos pontos coletados no Alto rio Madeira e afluentes nas duas expedições realizadas.

3.3. AMOSTRAGEM

As amostras utilizadas no presente projeto de mestrado fazem parte da amostragem do Projeto de Pesquisa: “Biogeoquímica de Metais Pesados no Alto rio Madeira”, firmado através do convênio de consultoria entre FURNAS/UNIR/RIOMAR, no período de 11/2003 à 12/2004.

As amostragens de solos foram realizadas em duas etapas: de 22-11 a 25-11-2003 e de 22-02 a 25-02-2004. O trabalho total do projeto envolveu uma equipe composta por 10 pessoas, utilizando-se 2 veículos tracionados 4x4, 2 voadeiras com motores de 25HP, além de equipamentos específicos do laboratório de Biogeoquímica/UNIR para a realização das coletas.

As coletas foram realizadas com trado holandês, sendo amostrado a fração superficial de até ± 30 cm. Posteriormente estas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas sob refrigeração ($<5^{\circ}\text{C}$) até o processamento em laboratório (CETESB, 1987).

Em laboratório as amostras foram submetidas à peneiração a úmido (fração $< 0,075\text{mm}$ ou 200 *mesh*). Posteriormente, as amostras de solo foram colocadas em graus de porcelana e levadas a estufas $\pm 60^{\circ}\text{C}$ para secagem. Depois de retirada toda a umidade, as amostras foram maceradas com pistilos de porcelana e acondicionadas em frascos de polietileno para posterior análise das concentrações dos elementos-traço.

3.4. MÉTODOS ANALÍTICOS

A metodologia aplicada no referente estudo para extração química dos elementos-traço presentes nos solos, exceto Hg, baseou-se numa extração *Strongly-Tied* com ácido nítrico (HNO_3 65%) e ácido clorídrico (HCl 37%) (APHA, 1971), tendo sido realizadas algumas adaptações pelo Laboratório de Biogeoquímica Ambiental – UNIR. A metodologia utilizada para determinação de Hg foi baseada em BASTOS *et al.*, (1998). Adotaram-se as extrações químicas citadas, para obtenção dos elementos-traço que estavam fortemente adsorvidos as partículas, fornecendo assim uma estimativa razoável do máximo disponível para as plantas ou para os corpos d’água. Além disso, estas metodologias são encontradas na maioria das publicações recentes que tratam desse tipo de amostragem e análise química (PÉREZ *et al.*, 1997; RAMALHO *et al.*, 2000; FADIGAS, *et al.*, 2002; BONOTTO & SILVEIRA, 2003; FADIGAS, *et al.*, 2006; VENDRAME, *et al.*, 2007; FERNANDES *et al.*, 2007).

3.4.1. Extrações Químicas

➤ **Para os elementos-traço Cd, Cu, Cr, Co, Pb, Mn, Zn, Fe:**

Foram pesados aproximadamente 2g de peso seco de solo em becker de 80mL e adicionaram-se 15mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3) e 2mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Em seguida as amostras foram colocadas em chapa quente a fim de acelerar o processo de extração química. Após a evaporação do HNO_3 , adicionaram-se 10mL de ácido clorídrico concentrado (HCl) nas amostras, as quais foram novamente submetidas à chapa quente. Após a concentração quase total das amostras, as mesmas foram ressuspendidas com 10mL de ácido clorídrico 0,1N. Em seguida as amostras foram filtradas por gravidade em papel de filtro (Whatmam 44), e aferiu-se o volume final em 14ml em tubos de teflon.

➤ **Para o elemento-traço Hg:**

Em tubos de ensaio de vidro, pesaram-se aproximadamente 0,5g de peso seco da amostra e adicionou-se 1 mL de água ultrapura (MILLI-Q 18.2 M Ω). Em seguida foram acrescentados 5 mL de água régia ($\text{HCl}:\text{HNO}_3$ 3:1), levando-se ao banho Maria por 15 min. a 60°C. Após resfriadas em banho de gelo, foram adicionados 10 mL de permanganato de potássio (KMnO_4) a 5%, levando-se ao banho Maria por mais 30 min. a 60°C. Posteriormente foi feita uma neutralização com cloridrato de hidroxilamina ($\text{HONH}_2\text{Cl}+\text{NaCl}$) a 12%, deixando-se em overnight. Posteriormente, filtrou-se as amostras por gravidade em papel de filtro (Whatmam 44), e aferiu-se o volume final em 14ml com ácido clorídrico (HCl 0,1N) em tubos de teflon.

3.4.2. Espectrofotometria de Absorção Atômica

As análises quantitativas dos elementos-traço presentes nos solos foram realizadas por Espectrofotometria de Absorção Atômica - AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*). A determinação de Hg foi realizada por AAS com sistema de injeção em fluxo (*Flow Injection Mercury System* - FIMS 400 - Perkin Elmer). Para os demais elementos-traço utilizou-se AAS por meio de chama (GBC-AVANTA, Modelo-3000).

O princípio de funcionamento destes aparelhos se baseia na propriedade que cada átomo possui em absorver um determinado comprimento de luz, com maior especificidade que os demais elementos. Sendo este pico de absorção exclusivo para cada elemento. A absorção de energia ocorre com a promoção do elétron para níveis de energia superiores

aqueles do estado fundamental. Para cada absorção característica de um dado elemento é absorvida energia respectiva a uma frequência no espectro eletromagnético com um dado comprimento de onda. Este fenômeno se deve ao arranjo eletrônico único, que cada átomo possui no estado fundamental, conferindo características intrínsecas a cada elemento químico. Sendo assim, com a excitação elétrica de uma lâmpada de cátodo-ôco (*hollow-cathode*) do elemento de interesse, emiti-se um feixe de luz no comprimento de onda do elemento, em meio a uma nuvem de átomos, que irão absorver esse comprimento de onda específico. Através da razão entre a luz que chegou ao detector óptico e a luz que saiu da fonte emissora, obtém-se a transmitância. Por meio de relações entre as absorbâncias de padrões analíticos e as concentrações destes, traçam-se curvas de calibração que servem para a determinação das concentrações dos elementos-traço presentes nas amostras (MENDHAN *et al.*, 2002).

Na espectrofotometria de absorção atômica para cada elemento analisado variam as condições de operação do equipamento. Sendo assim, estimou-se o Limite de Detecção da Técnica Analítica (LDT), para cada elemento-traço estudado (tabela 08), tomando-se os valores médios dos brancos analisados para controle (frascos com os reagentes químicos utilizados, porém sem a amostra de solo), multiplicando-se pelo volume final (14 ml) e dividindo-se pela média das massas de todas as amostras analisadas, conforme proposto por BASTOS *et al.*, (1998) e segundo a seguinte fórmula:

$$\text{LDT} = \frac{\text{média dos brancos} \times \text{volume final}}{\text{média das massas}}$$

Tabela 08. Limites de Detecção da Técnica (LDT) para cada elemento-traço analisado.

	Cd	Co	Cr	Cu	Pb	Zn	Mn	Fe	Hg
	(ppm)								
	$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$								
LDT	0,086	0,190	0,258	0,230	0,290	0,329	0,231	0,699	0,020

3.4.3. Análise dos dados

Após a obtenção dos dados em laboratório, foi montada uma matriz de dados considerando-se as diferentes variáveis geoquímicas (apêndice 01), para posterior confecção de um banco de dados georreferenciado, e extração das informações derivadas do cruzamento das variáveis.

Foram utilizadas técnicas de análise descritiva ou exploratória, que são essenciais para visualizar as propriedades estatísticas e matemáticas dos dados (LANDIM, 2000). Os parâmetros estatísticos que descrevem um conjunto de dados podem ser divididos em três classes: (a) de tendência central, (b) de dispersão e (c) de assimetria e curtose. Neste sentido, as medidas estatísticas utilizadas no estudo foram: média, mediana, desvio padrão, valor máximo e mínimo, variância e coeficiente de variação. Parâmetros de fundamental importância para a tomada de decisões sobre os métodos estatísticos a serem utilizados.

Posteriormente, os dados foram analisados através da Análise de Componentes Principais, para a determinação das variáveis mais importantes no estudo e verificarem-se os principais padrões de variação do conjunto de dados (LANDIM, 2000).

Utilizaram-se também técnicas de geoprocessamento para elaboração de mapas de distribuição espacial das concentrações dos elementos-traço nos solos ao longo da área estudada. Para a manipulação dos dados foram utilizados os programas: STATISTICA, versão 7.0 (StatSoft *Inc.*, 2001) e ArcGIS, versão 9.0 (ESRI *Inc.*, 2008).

3.4.3.1. Análise de Componentes Principais - ACP

Em estudos ambientais com muitas amostras e variáveis, sejam elas físicas, químicas ou biológicas, uma das formas de avaliar o conjunto de dados gerados é a análise estatística multivariada. Uma importante abordagem em análise multivariada ou multidimensional se baseia na redução da dimensionalidade e na detecção de padrões (gradientes e tendências) em grandes conjuntos de dados (BERNARDI *et al.*, 2001).

Entre os métodos da estatística multivariada, a Análise das Componentes Principais (ACP) vem sendo utilizada com bastante relevância por vários pesquisadores na avaliação dos solos (BERNARDI *et al.*, 2001; FADIGAS, *et al.*, 2002; MOURA *et al.*, 2006; FADIGAS, *et al.*, 2006; VENDRAME, *et al.*, 2007) para ordenação e redução do número de variáveis, fornecendo uma visão privilegiada dos principais padrões de variação do conjunto de dados.

A análise das componentes principais inicia-se com o cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variâncias e co-variâncias ou de correlações entre variáveis e tal procedimento é conhecido como modo “R”. O primeiro autovalor a ser determinado corresponderá à maior porcentagem da variabilidade total existente no conjunto de dados, o segundo pela maior variação possível restante, e assim por diante até que toda a variação do conjunto tenha sido explicada (LANDIM, 2000).

Os autovetores correspondem às componentes principais e é o resultado do carregamento das variáveis originais em cada um deles. Tais carregamentos podem ser considerados como uma medida da relativa importância de cada variável em relação às componentes principais e os respectivos sinais, se positivos ou negativos, indicam relações diretamente e inversamente proporcionais (MOURA *et al.*, 2006).

A matriz de carregamentos de cada variável nas componentes principais ao ser multiplicado pela matriz original de dados fornecerá a matriz de contagens (escores) de cada caso em relação às componentes principais. Esses valores podem ser dispostos num diagrama de dispersão, em que os eixos são as duas componentes mais importantes, e mostrar o relacionamento entre os casos condicionados pelas variáveis medidas (LANDIM, 2000).

A análise das componentes principais é, portanto, uma técnica de transformação de variáveis. Se cada variável medida pode ser considerada como um eixo de variabilidade, estando usualmente correlacionada com outras variáveis, esta análise transforma os dados de tal modo a descrever a mesma variabilidade total existente, com o mesmo número de eixos originais, porém não mais correlacionados entre si. Graficamente pode ser descrita como a rotação de pontos existentes num espaço multidimensional originando eixos, ou componentes principais, que dispostos num espaço a duas dimensões representem variabilidade suficiente que possa indicar algum padrão a ser interpretado (MOURA *et al.*, 2006).

Desse modo a determinação das componentes principais permite, com frequência, diminuir o número de variáveis a serem estudadas em função de sua importância relativa, isto é, podem-se desprezar as componentes de menor variação relativa (BERNARDI *et al.*, 2001).

A análise de componentes principais (PCA) é deduzida conforme Landim (2000), como uma equação matemática onde: se A for uma matriz simétrica de variâncias e covariâncias, de dimensões $p \times p$, com termos a_{ij} , de onde os autovalores e os autovetores serão extraídos, V_i o $i^{\text{ésimo}}$ autovetor, cujos termos são v_{ij} , e λ_i o $i^{\text{ésimo}}$ autovalor, tal relação pode ser expressa por: $(A - \lambda_i I) V_i = 0$, onde I é a matriz de identidade.

Alternativamente a relação acima pode ser escrita por: $AV_i = V_i \lambda_i$, ou, $[A][V] = [V][\Lambda]$, onde: $[V]$ é uma matriz, $p \times p$, de todos os autovetores e $[\Lambda]$ é uma matriz diagonal, $p \times p$, com os autovalores λ_i .

Multiplicando ambos os lados da equação pela transposta de V , V' :

$$[A] = [V] [\Lambda] [V]'$$

A soma dos autovalores é igual à soma dos termos da diagonal em $[A]$, ou seja, a soma das variâncias: $\sum \lambda_i = \sum a_{ii}$, e por definição $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_p$.

Resolvendo a equação $[A] = [V] [\Lambda] [V]'$ para λ , as raízes determinantes serão os autovalores. Encontrados os autovalores, substituindo-os nas equações simultâneas e resolvendo-as, obtêm-se para cada autovetor correspondente, as componentes principais.

Pode-se definir a variância total existente em um conjunto de dados multivariados pela soma das variâncias de cada uma das variáveis. Numa matriz de variâncias e covariâncias, essas variâncias individuais constituem os elementos da diagonal principal. Basta somá-los, portanto, encontrando o traço da matriz para se obter a variabilidade total e, em seguida, a contribuição de cada variável. A soma dos autovalores de uma matriz, igual ao traço dessa matriz, representa também a variabilidade total da mesma e a contribuição de cada autovalor em termos de variabilidade é determinada. Ao primeiro corresponderá a maior variabilidade possível existente, ao segundo a maior variabilidade restante, e assim por diante.

Em termos geométricos, o primeiro autovalor representa o eixo principal de maior comprimento; o segundo autovalor, um segundo vetor em comprimento, situado em posição ortogonal em relação ao primeiro, e assim sucessivamente.

Os elementos de cada um dos autovetores encontrados são coeficientes de equações lineares que transformam os dados originais em contagens (scores) indicativas do respectivo carregamento sobre os eixos correspondentes. Desse modo, utilizando-se da multiplicação da matriz de dados originais pela de autovetores, obtêm-se uma matriz de dados transformados que representam projeções dos pontos, num espaço multidimensional, sobre os diversos componentes principais.

$$[S^R] = [X] [V], \text{ onde}$$

$[X]$ = matriz de dados originais, $[n \times m]$

$[V]$ = matriz quadrada $[m \times m]$ contendo os autovetores

$[S^R]$ = matriz $[n \times m]$ das contagens sobre as componentes principais

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CONTROLE DE QUALIDADE

Para controle de qualidade do processo analítico, as amostras foram analisadas em duplicatas e acompanhadas de um branco controle, com o qual se pode subtrair as possíveis contaminações do ambiente de trabalho e dos reagentes utilizados nas extrações químicas. Também foram utilizadas amostras certificadas de sedimento (IAEA 356 - Hg e DC 73307 – Mn) em cada análise realizada, objetivando-se maior certeza do grau analítico dos resultados (tabela 09).

Tabela 09. Concentração de Hg ($\mu\text{g.g}^{-1}$) e Mn ($\mu\text{g.g}^{-1}$) em amostras de Referência Certificada.

AMOSTRA REFERÊNCIA	VALOR DE REFERÊNCIA		VALOR DO LAB. DE BIOGEOQUÍMICA (UNIR)		
	Média \pm D.P.	Intervalo	Média \pm D.P.	Intervalo	Desvio Relativo (%)
IAEA. 356 – Hg	7,62 \pm 0,88	6,74 - 7,98	7,12 \pm 0,71 (n= 15)	6,32 - 7,58	5
DC 73307 – Mn	620,1 \pm 8,0	600,5 - 640,3	610,59 \pm 0,71 (n= 10)	600,32 – 620,2	3

Além destas formas de controle, a participação em programas de exercícios de intercalibração entre grupos de diferentes países também foi utilizada, dando-se continuidade ao Programa de Exercícios de Intercomparação laboratorial com o laboratório do Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Pois, desde junho de 2000, o Laboratório de Biogeoquímica Ambiental participa do Programa Interlaboratorial com o *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo* do *Ministério de Trabajo y Seguridad Social* do Governo da Cantabria, Espanha.

4.2. ELEMENTOS-TRAÇO NOS SOLOS DO ALTO RIO MADEIRA E VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA

No apêndice 01 é apresentada a matriz dos dados obtidos, com as concentrações dos elementos-traço Cd, Cu, Cr, Co, Pb, Zn, Mn, Fe e Hg nos solos do Alto rio Madeira, bem como as demais informações levantadas sobre cada ponto de coleta.

Na tabela 10 são apresentados à média aritmética, o desvio padrão e os valores mínimos e máximos dos elementos-traço nas 32 amostras de solos analisadas, além de valores encontrados em alguns trabalhos. Em relação ao elemento Cd, todas as amostras analisadas apresentaram concentração abaixo do limite de detecção da técnica ($<0,086 \mu\text{g.g}^{-1}$), exceto o ponto P4, onde foi encontrado $0,09 \mu\text{g.g}^{-1}$ deste elemento.

Tendo em vista que não existe no estado de Rondônia uma legislação específica sobre valores orientadores de elementos-traço em solos, foi utilizado para fins comparativos os valores orientadores de Referência de Qualidade (VRQ) e Prevenção (VP) da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (tabela 05) (CETESB, 2005).

Comparando os valores obtidos no presente estudo com os valores orientadores de referência de qualidade VRQ, foi possível observar que todos os pontos amostrados apresentaram concentrações de Cd, Cu, Cr, Co e Pb inferiores aos valores preconizados pela CETESB. Já os elementos Zn e Hg apresentaram concentrações superiores à VRQ em 12 pontos para Zn e 22 pontos para Hg, dentre os 32 pontos analisados.

Contudo, todas as concentrações de elementos-traço ficaram abaixo dos valores de prevenção recomendados pela CETESB. Indicando de forma geral, que os solos do Alto rio Madeira apresentam concentrações de elementos-traço (exceto Hg) dentro dos padrões considerados naturais, sugerindo pouca ou nenhuma contribuição antrópica.

No entanto, conclusões definitivas devem ser tomadas com cautela e precedidas de análises mais detalhadas, de forma a contemplar adequadamente a variabilidade dos solos da região. Pois os limites considerados são os recomendados para os solos encontrados no Estado de São Paulo, reforçando assim a necessidade do estabelecimento de valores orientadores por unidade da Federação ou até mesmo por regiões específicas.

Ainda que alguns pontos tenham apresentado concentrações superiores aos valores (VRQ) da CETESB, as concentrações médias observadas nesse estudo, exceto Hg (tabela 10) apresentam-se dentro do intervalo proposto por Fadigas *et al.* (2006), como valores de referência considerados normais para elementos-traço em solos brasileiros não poluídos. Todos os elementos-traço analisados também apresentaram concentrações médias abaixo dos teores médios encontrados em solos do mundo (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

Os valores obtidos no presente estudo também estão condizentes com os valores médios encontrados por Fadigas *et al.* (2002), Campos *et al.* (2003), e Pérez *et al.* (1997) com algumas exceções. Estes autores avaliaram os teores de elementos-traço em diversas classes de solos brasileiros usando extrações químicas análogas à utilizada neste estudo.

Em relação aos valores encontrados por Marques *et al.* (2004), Vendrame *et al.* (2007) e Fernandes *et al.* (2007), observa-se maiores divergências quanto aos valores máximos encontrados por estes autores para alguns elementos, principalmente Cr, Cu, Pb e Fe. As altas concentrações encontradas por estes autores estão relacionadas com as características pedológicas e influências antrópicas dos solos analisados: solos do cerrado brasileiro, solos de cerrado com influência antrópica de pastagens e solos utilizados na agricultura de olerícolas.

Ressalva-se que estes autores utilizaram técnicas de extração química com ácido fluorídrico, as quais promovem a abertura total das amostras disponibilizando os elementos que estão imobilizados na matriz cristalina das partículas dos solos. Assim, acredita-se que os menores teores de elementos-traço dos solos pesquisados no rio Madeira devem-se também à menor eficiência da extração química utilizada com os ácidos nítrico e clorídrico, em relação a essa técnica de abertura total. Os valores obtidos no presente estudo também são distintos dos verificados em Licht & Plawiak (2005), o que provavelmente deve estar relacionado ao horizonte analisado por estes autores (horizonte B), além da extração com ácido fluorídrico.

As concentrações de Hg, encontradas nos solos deste estudo, variaram de 0,023 a 0,225 $\mu\text{g.g}^{-1}$, com média de $0,080 \pm 0,041 \mu\text{g.g}^{-1}$. Estes valores estão próximos aos já descritos na calha do rio Madeira, a exemplo de Lacerda *et al.* (1987), que encontraram concentrações variando de 0,035 a 0,300 $\mu\text{g.g}^{-1}$ de Hg em solos próximos às áreas mais exploradas no auge da atividade garimpeira. Posteriormente, Malm *et al.* (1991) encontraram concentrações variando de 0,030 a 0,340 $\mu\text{g.g}^{-1}$, estando incluído neste estudo alguns pontos mais distantes das áreas garimpeiras. Mais recentemente Lechler *et al.* (2000) encontraram concentrações mais elevadas de Hg em solos do Baixo Madeira, entre 0,232 e 0,439 $\mu\text{g.g}^{-1}$.

As concentrações de Hg encontradas no presente estudo também estão próximas aos intervalos encontrados em solos de outras regiões da Amazônia e do Brasil, tais como: Bacia do baixo Tapajós, com concentrações de Hg variando de 0,090 a 0,210 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (ROULET *et al.*, 1998); Bacia do rio Tocantins com teores de 0,080 a 0,120 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (AULA *et al.*, 1994); Bacia do Rio Negro com média de 0,172 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (FADINI & JARDIM, 2001); Serra do Navio no Amapá com intervalo de 0,100 a 0,300 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (FOSTIER *et al.*, 2000); Solos do Horizonte B no Paraná com concentração média de 0,060 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (LICHT & PLAWIAK, 2005).

Tabela 10. Concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$ -ppm) nos solos do Alto do rio Madeira e em solos de diferentes trabalhos.

<i>Trabalhos</i>	<i>[Cd]</i>	<i>[Co]</i>	<i>[Cr]</i>	<i>[Cu]</i>	<i>[Pb]</i>	<i>[Zn]</i>	<i>[Mn]</i>	<i>[Fe]</i>
Kabata-Pendias & Pendias (2001)^b	0,1	10,0	67,0	24,0	29,0	67,0	558,0	-
Pérez <i>et al.</i> (1997)^d	-	15,41 ± 19,63 (0,3-54,79)	56,30 ± 53,09 (7,46-148,54)	49,41 ± 59,53 (2,15-165,07)	10,68 ± 9,98 (0,52-36,55)	24,41 ± 23,98 (0,32-63,02)	432,47 ± 545,26 (0,87-1732,38)	29400,0 ± 31386,14 (100,0-76800,0)
Fadigas <i>et al.</i> (2002)^a	-	1,7 - 9,6	9,6 - 75,0	1,6 - 14,3	-	5,4 - 37,8	57,0 - 394,0	5900,0 - 62380,0
Campos <i>et al.</i> (2003)^d	0,66 ± 0,19 0,37 - 1,01	-	-	65,0 ± 74,0 3,0 - 238,0	22,0 ± 9,0 10,0 - 49,0	39,0 ± 2,0 12,0 - 96,0	-	-
Marques <i>et al.</i> (2004)^c	-	5,0 ± 6,0	112,0 ± 69,0	33,0 ± 55,0	26,0 ± 120,0	38,0 ± 54,0	455,0 ± 583,0	75000,0 ± 60000,0
Licht & Plawiak (2005)^b	0,18	23,84	105,42	141,72	23,21	75,26	736,84	105265,72
Fadigas <i>et al.</i> (2006)^a	-	2,0 - 20,0	19,0 - 65,0	2,0 - 119,0	3,0 - 40,0	6,0 - 79,0	40,7 - 522,3	6500,0 - 72700,0
Vendrame <i>et al.</i> (2007)^b	-	-	-	28,76	-	36,01	151,0	66690,0
Fernandes <i>et al.</i> (2007)^d	6,53 ± 3,1 (1,82-16,22)	-	111,71 ± 74,3 (13,47-411,65)	13,18 ± 17,1 (<LDT-118,75)	5,23 ± 7,8 (<LDT-36,12)	41,88 ± 34,5 (8,33-275,41)	367,0 ± 291,0 (70,0-1756,0)	148695,0 ± 358382,0 (19709,0-929143,0)
Presente estudo^d	<0,086-0,09	4,94 ± 3,59 <0,19 - 10,98	7,35 ± 2,14 (3,06-12,46)	7,04 ± 3,77 (1,59-14,45)	7,20 ± 3,0 (1,78-13,78)	45,58 ± 27,93 (7,04-95,35)	294,02 ± 278,50 (17,75-1000,98)	20314,18 ± 9708,71 (4.002,88-41.294,75)

Nota: ^a valores expressos em mínimo – máximo encontrado; ^b valores expressos em média; ^c valores expressos em média ± desvio padrão; ^d valores expressos em média ± desvio padrão, (mínimo – máximo).

4.3. ELEMENTOS-TRAÇO NAS DIFERENTES CLASSES DE SOLOS

Na tabela 11 são apresentadas às concentrações dos elementos-traço distribuídas por classes de solos. Os valores são apresentados em forma de estatística descritiva através das grandezas: média aritmética, desvio padrão e valores mínimos e máximos observados.

De modo geral, as concentrações de elementos-traço encontradas nas amostras das diferentes classes de solos do Alto rio Madeira foram heterogêneas. Este comportamento também foi observado em vários trabalhos, tais como: Oliveira (1996), Pérez *et al.* (1997), Marques (2000), Fadigas *et al.* (2002) e Fadigas *et al.* (2006). Segundo estes autores a heterogeneidade de elementos-traço encontrada nas classes de solos está relacionada com os materiais de origem, características físicas e químicas, tipos de usos do solo e contribuições antrópicas.

A classe de solos Areias Quartzosas apresentou maiores concentrações de Co (8,74 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), Zn (64,25 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) e Hg (0,11 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), e menor concentração de Cr (6,51 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) quando comparada as médias das demais classes estudadas. Embora as outras classes apresentem pontos com concentrações acima e abaixo destes valores.

Na classe Areias Quartzosas chama-se atenção para a concentração de Hg encontrada, que foi de 0,11 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, estando acima da média geral (0,080 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) da área de estudo. Esta concentração de Hg é considerada irregular já que esta classe de solo é essencialmente mineral, desenvolvida de sedimentos areno-quartzosos ou arenitos, onde predomina a fração areia, ou seja, apresenta pouca argila e matéria orgânica. Esta concentração atípica está relacionada à proximidade do setor de garimpagem Prainha, que corresponde a uma das áreas mais garimpadas na década de 80, conforme levantamento do Departamento Nacional de Pesquisas Mineral - DNPM (BRASIL, 1983).

Os valores obtidos na classe Areias Quartzosas estão acima dos encontrados por Marques (2000), exceto para Cr e Pb. Pois, este autor encontrou 3,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Co, 9,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Pb, 2,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Cu, 35,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Cr, 9,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Zn, 282,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Mn, e 10000,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Fe, em solos desta mesma classe sob pastagem nativa de cerrado.

A classe dos Cambissolos apresentou as menores concentrações médias de Pb (4,94 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), Zn (35,38 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) e Fe (15021,67 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) entre as classes amostradas. Apesar das outras classes apresentarem algumas amostras com concentrações abaixo destes valores. Em relação aos valores encontrados por Marques (2000) em solos da mesma classe no cerrado (14,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Co, 12,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Pb, 25,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Cu, 125,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Cr, 37,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Zn, 595,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Mn, e 124000,0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de Fe), observou-se um comportamento distinto do

encontrado na classe das Areias Quartzosas, ou seja, as concentrações de elementos-traço encontradas nos Cambissolos do presente estudo ficaram abaixo dos valores encontrados por esse autor, exceto para Cr e Fe.

O comportamento acima também é observado quando se compara o presente estudo com os valores encontrados em Fadigas *et al.* (2006), para Co ($13,4 \pm 1,56 \mu\text{g.g}^{-1}$), Pb ($18,5 \pm 3,54 \mu\text{g.g}^{-1}$), Cu ($29,5 \pm 6,36 \mu\text{g.g}^{-1}$), Cr ($19,5 \pm 3,54 \mu\text{g.g}^{-1}$) e Zn ($78,0 \pm 5,66 \mu\text{g.g}^{-1}$), em solos desta classe.

A classe dos solos Podzólicos Vermelho-Amarelos (PVA) apresentou concentrações médias de elementos-traço próximas às encontradas nas demais classes estudadas. No entanto, esta classe apresentou as menores concentrações de Hg ($0,02$ e $0,03 \mu\text{g.g}^{-1}$) dentre todos os pontos analisados. Estas baixas concentrações estão relacionadas ao fato destes pontos amostrais estarem localizados as margens do rio Mamoré, ou seja, são os pontos mais distantes da região de influência do garimpo de ouro do rio Madeira.

Ao se comparar os valores encontrados nos solos PVA estudados com os encontrados por Pérez *et al.* (1997), que foram $8500,0 \pm 6135,35 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Fe, $138,95 \pm 264,49 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Mn, $2,15 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu, $9,69 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cr, $4,62 \pm 3,55 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, $7,79 \pm 3,84 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Zn, e $1,96 \pm 0,94 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Co, para a mesma classe de solo e extração química, observa-se que os solos estudados apresentam maiores concentrações de todos os elementos-traço, exceto o Cr.

A classe dos Gleissolos foi a que teve maior número de amostras analisadas. Conseqüentemente também foi à classe que mais apresentou diferença entre os valores mínimos e máximos encontrados. Observando a tabela 11, contata-se nesta classe os pontos com as maiores concentrações encontradas de Cu ($14,45 \mu\text{g.g}^{-1}$), Pb ($13,78 \mu\text{g.g}^{-1}$) e Hg ($0,22 \mu\text{g.g}^{-1}$), e as menores concentrações de Cu ($1,59 \mu\text{g.g}^{-1}$), Pb ($1,78 \mu\text{g.g}^{-1}$), Cr ($3,06 \mu\text{g.g}^{-1}$), Mn ($17,75 \mu\text{g.g}^{-1}$) e Fe ($4002,88 \mu\text{g.g}^{-1}$) entre todos os pontos analisados. Mas em termos médios apenas Pb ($8,41 \pm 3,48 \mu\text{g.g}^{-1}$) e Hg ($0,10 \pm 0,05 \mu\text{g.g}^{-1}$) se destacam das demais classes estudadas.

Comparando as concentrações de elementos-traço nos Gleissolos do presente estudo com as encontradas por Pérez *et al.* (1997), $11120,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Fe, $7,82 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Mn, $22,24 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu, $55,71 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cr, $7,96 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, e <LDT para Co e Zn, para a mesma classe de solo e extração química, nota-se que os Gleissolos estudados apresentam menores concentrações de Cu, Pb e Cr, e maiores concentrações de Co, Zn, Mn e Fe.

Os Latossolos brasileiros diferenciam-se entre si principalmente pela coloração e pelos teores de óxidos de ferro (CAMPOS *et al.*, 2003). Este comportamento foi constatado no presente estudo tendo em vista a maior concentração média de Fe encontrada na classe dos

Latossolos Vermelho-Amarelos ($23126,96 \pm 10913,64 \mu\text{g.g}^{-1}$) comparada a média dos Latossolos Amarelos ($20976,03 \pm 4068,29 \mu\text{g.g}^{-1}$).

Os Latossolos Amarelos (LA) também apresentaram concentrações médias de elementos-traço próximas às encontradas nas demais classes estudadas. Se destacando apenas com a maior concentração média do elemento Mn ($432,66 \pm 353,38 \mu\text{g.g}^{-1}$).

Comparando-se as concentrações de elementos-traço encontradas na classe LA com os seguintes valores encontrados na literatura para a mesma classe de solos:

- Pérez *et al.* (1997): encontrou concentrações >LDT para Co, Cu, Pb e Zn, $12,86 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cr, $15,43 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Mn, e $4400,00 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Fe;
- Marques (2000): encontrou $2,0 \pm 1,41 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Co, $73,5 \pm 47,38 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cr, $4,0 \pm 4,24 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu, $4,5 \pm 0,71 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, $16,5 \pm 9,19 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Zn, $138,0 \pm 52,33 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Mn, e $4500,0 \pm 42426,41 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Fe;
- Campos *et al.* (2003): encontrou $37,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu, $13,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, $21,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Zn;
- Fadigas *et al.* (2006): encontrou $2,88 \pm 0,74 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Co, $29,0 \pm 14,42 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cr, $6,67 \pm 4,04 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu, $5,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, $14,83 \pm 11,97 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Zn;

Constata-se, de forma geral, que os solos LA da área estudada sempre apresentaram menores concentrações de Cr, em alguns casos Cu, Pb e Mn, e maiores concentrações dos demais elementos estudados.

Na classe dos Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) encontram-se os pontos com as maiores concentrações dos elementos Cd ($0,09 \mu\text{g.g}^{-1}$), Co ($10,98 \mu\text{g.g}^{-1}$), Cr ($12,46 \mu\text{g.g}^{-1}$), Zn ($95,35 \mu\text{g.g}^{-1}$), Mn ($1000,98 \mu\text{g.g}^{-1}$) e Fe ($41294,75 \mu\text{g.g}^{-1}$). Levando esta classe a ter as maiores concentrações médias dos elementos-traço Co ($7,66 \pm 3,60 \mu\text{g.g}^{-1}$), Cu ($8,02 \pm 4,67 \mu\text{g.g}^{-1}$), Cr ($8,13 \pm 2,93 \mu\text{g.g}^{-1}$), Zn ($60,31 \pm 34,63 \mu\text{g.g}^{-1}$) e Fe ($23621,93 \pm 11690,69 \mu\text{g.g}^{-1}$).

Comparando-se os valores do presente estudo aos valores encontrados por Marques (2000), em solos da mesma classe (LVA) no cerrado ($3,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Co, $2,0 - 10,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, $3,0 - 15,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu, $112,0 - 124,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cr, $19,0 - 33,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Zn, $116,0 - 164,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Mn, e $47000,0 - 95000,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Fe), nota-se que os solos LVA da área estudada apresentaram menores concentrações de Cr e Fe, e maiores de Cu, Co, Pb, Zn, Mn. Já em relação a Campos *et al.* (2003), que encontrou $0,47 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cd, $13,0 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Pb, $37 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Cu e $21 \mu\text{g.g}^{-1}$ de Zn em solos desta classe, observa-se na área de estudo que apenas a concentração do elemento Zn está acima dos valores encontrados por este autor.

Tabela 11. Estatística descritiva das concentrações de elementos-traço ($\mu\text{g.g}^{-1}$ - ppm) nas classes de solos do Alto do rio Madeira.

<i>Classe de solos</i>	<i>n^o</i>	<i>[Cd]</i>	<i>[Co]</i>	<i>[Cr]</i>	<i>[Cu]</i>	<i>[Pb]</i>	<i>[Hg]</i>	<i>[Zn]</i>	<i>[Mn]</i>	<i>[Fe]</i>
AQ – Areias Quartzosas	1	<LDT	8,74	6,51	8,19	7,05	0,11	64,25	420,469	21327,54
C – Cambissolos	3	<LDT	3,82 ± 4,41 (<LDT-6,93)	6,57 ± 0,85 (5,61-7,23)	6,44 ± 5,36 (2,25-12,48)	4,94 ± 2,54 (3,31-7,87)	0,06 ± 0,04 (0,03-0,11)	35,38 ± 37,05 (7,94-77,52)	204,91 ± 183,23 (86,73-415,98)	15021,67 ± 8778,37 (7639,70-24728,43)
LA - Latossolos Amarelos	6	<LDT	4,52 ± 2,47 (<LDT-6,29)	7,21 ± 2,19 (3,37-9,06)	5,96 ± 2,10 (2,49-8,78)	5,85 ± 2,18 (3,26-9,44)	0,09 ± 0,03 (0,05-0,14)	40,69 ± 21,54 (9,77-60,40)	432,66 ± 353,38 (31,43-975,71)	20976,03 ± 4068,29 (17282,28-26853,70)
LVA - Latossolos Vermelho-Amarelos	7	0,09 (<LDT-0,09)	7,66 ± 3,60 (<LDT-10,98)	8,13 ± 2,93 (3,32-12,46)	8,02 ± 4,67 (1,81-13,42)	7,52 ± 2,44 (4,22-11,20)	0,06 ± 0,03 (0,03-0,10)	60,31 ± 34,63 (7,04-95,35)	455,35 ± 367,89 (19,75-1000,98)	23621,93 ± 11690,69 (8508,51-41294,75)
PVA – Podzólicos Vermelho-Amarelos	2	<LDT	6,12 ± 2,27 (4,52-7,72)	7,92 ± 0,86 (7,31-8,53)	6,84 ± 1,49 (5,79-7,90)	5,80 ± 3,42 (3,38-8,22)	0,03 ± 0,01 (0,02-0,03)	52,50 ± 7,09 (47,49-57,52)	341,76 ± 73,13 (290,05-393,47)	22020,76 ± 8119,13 (16279,67-27761,85)
G – Gleissolos	13	<LDT	3,43 ± 3,60 (<LDT-10,07)	7,15 ± 2,17 (3,06-11,21)	7,08 ± 4,20 (1,59-14,45)	8,41 ± 3,48 (1,78-13,78)	0,10 ± 0,05 (0,04-0,22)	39,77 ± 27,41 (7,70-81,42)	146,67 ± 150,39 (17,75-463,03)	19108,46 ± 11583,76 (4002,88-38310,56)

Nota: Valores expressos em média ± desvio padrão, e (mínimo – máximo) encontrados.

4.4. ELEMENTOS-TRAÇO E OS DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO

A figura 08 apresenta as médias e valores mínimos e máximos das concentrações dos elementos-traço por usos do solo. Ressalta-se que existe diferença entre o número amostral de cada tipo de uso do solo: Agricultura (n = 5), Pastagem (n = 7) e Floresta (n = 20), o que influencia na discrepância entre os valores médios.

Os locais amostrados que ainda apresentam cobertura da floresta, demonstraram um maior intervalo entre as concentrações mínimas e máximas. Seguido das áreas onde a cobertura florestal foi convertida para pastagem, e posteriormente do uso para agricultura que apresenta as menores variações entre as concentrações mínimas e máximas, exceto para Zn.

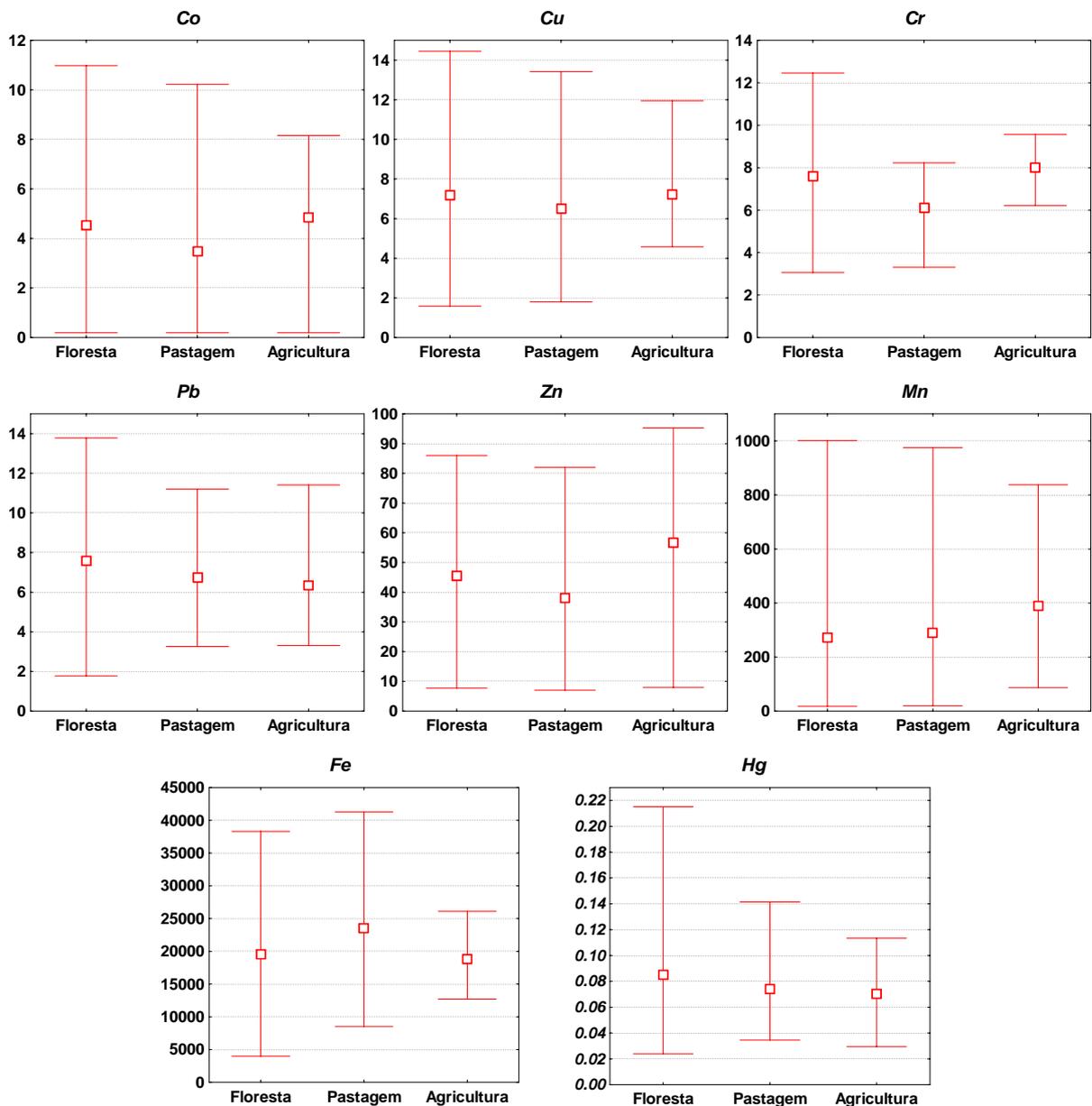


Figura 08. Gráficos Box-plots das concentrações de elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira: □ Média, ┆ Intervalo de valores Mínimo – Máximo.

As concentrações médias de Co (4,81 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Cu (6,5 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Pb (6,76 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Zn (38,15 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Mn (288,46 $\mu\text{g.g}^{-1}$) e Fe (23542,17 $\mu\text{g.g}^{-1}$) encontradas nos solos sob pastagem da área estudada divergem das concentrações encontradas por Vendrame *et al.* (2007) de Cu (28,76 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Zn (36,01 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Mn (151,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$) e Fe (66690,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$) em solos sob pastagem na região do cerrado brasileiro. Com exceção do elemento Zn que apresenta concentrações muito próximas.

Os intervalos nas concentrações dos elementos-traço Co (4,52 a 8,16 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Cu (4,58 a 11,95 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Pb (3,31 a 11,41 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Cr (6,22 a 9,57 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Zn (7,94 a 95,35 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Mn (86,73 a 837,55 $\mu\text{g.g}^{-1}$) e Fe (12696,86 a 26106,32 $\mu\text{g.g}^{-1}$) encontrados nos solos sob agricultura da área estudada estão abaixo dos intervalos encontrados por Fernandes *et al.* (2007), que estudou solos agrícolas com cultivo de olerícolas no estado de Minas Gerais. Neste local os autores encontraram intervalos (em $\mu\text{g.g}^{-1}$) que variaram de: 0 a 118,75 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para Cu; 0 a 36,12 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para Pb; 13,47 a 411,65 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para Cr; 8,33 a 275,41 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para Zn; 70,0 a 1756,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para Mn; e de 19709,0 a 929143,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para Fe. Provavelmente, as menores concentrações de elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira devem-se à menor eficiência da extração química utilizada com os ácidos nítrico e clorídrico, em comparação à técnica de abertura total com ácido fluorídrico utilizada por Fernandes *et al.* (2007).

As áreas sob pastagens e agricultura nas margens do rio Madeira também apresentaram menores concentrações de elementos-traço, exceto Co e Mn, em relação aos solos sob pastagens e agricultura (oleicultura) na microbacia de Caetés, município de Paty do Alferes-RJ. Nessa região Ramalho *et al.* (2000) encontrou as seguintes concentrações em pastagens: Co (4,75 a 6,86 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Cu (24,43 a 30,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Pb (20,62 a 28,33 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Zn (66,13 a 109,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$), e Mn (147,6 a 219,8 $\mu\text{g.g}^{-1}$). Nos solos de agricultura (oleicultura) os autores encontraram as seguintes variações de: Co (2,78 a 4,71 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Cu (19,34 a 26,41 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Pb (23,29 a 27,42 $\mu\text{g.g}^{-1}$), Zn (21,07 a 58,88 $\mu\text{g.g}^{-1}$), e Mn (29,1 a 183,2 $\mu\text{g.g}^{-1}$).

O elemento Hg apresenta o mesmo comportamento geral dos demais elementos-traço, ou seja, com o maior intervalo entre as concentrações mínimas e máximas 0,02 a 0,22 $\mu\text{g.g}^{-1}$ nas áreas de floresta. Seguido pelas áreas convertidas para pastagem com intervalo de 0,03 a 0,14 $\mu\text{g.g}^{-1}$. E por último as áreas utilizadas para agricultura com intervalo entre 0,03 e 0,11 $\mu\text{g.g}^{-1}$. Em outros estudos, como Lacerda *et al.* (2004) e Almeida *et al.* (2005), observa-se o mesmo comportamento, ou seja, nos locais utilizados para agricultura e pastagens as concentrações de Hg tendem a diminuir devido ao processo de desmatamento seguido da queima da vegetação e conseqüente volatilização do Hg presente nos solos.

4.5. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS - ACP

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos através do método estatístico multivariado - Análise de Componentes Principais. O estudo de ACP foi realizado com o objetivo de se verificar quais associações, entre elementos-traço e pontos de amostragem, ocorrem nos solos do Alto rio Madeira. Previamente à ACP, as variáveis da matriz de dados (apêndice 01) foram padronizadas adotando-se a média como zero (0) e desvio padrão igual a um (1). Este artifício matemático, que não interfere na relação entre os dados, foi necessário, pois a matriz de dados apresenta variáveis com valores em escalas diferentes (ex. Fe e Hg).

No estudo das variáveis geoquímicas dos solos, utilizaram-se os elementos-traço: Co, Cu, Cr, Pb, Hg, Zn, Mn e Fe (apêndice 01). Os dados de Cd não foram utilizados na ACP, pois não foi possível a detecção deste elemento, através da técnica de AAS, na maioria dos pontos amostrados. Para os pontos que tiveram os valores de Co abaixo do limite de detecção da técnica – LDT (tabela 08) foi utilizado o próprio LDT como valor na execução da análise estatística.

Na tabela 12 apresentam-se os autovalores e a porcentagem de variância explicada para as 8 componentes principais obtidas, bem como os valores acumulados. Observa-se que apenas as 3 primeiras componentes têm os seus autovalores acima de 1. Desta forma, na área de estudo as 3 primeiras componentes são responsáveis por 81,35 % da variabilidade original dos dados.

Tabela 12. Autovalores e a variância explicada das 8 componentes obtidas dos elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira.

Componentes	Autovalores	% total da variância	Autovalores acumulados	% total da variância acumulada
CP 1	4,36	54,54	4,36	54,54
CP 2	1,12	14,04	5,49	68,58
CP 3	1,02	12,77	6,51	81,35
CP 4	0,74	9,26	7,25	90,61
CP 5	0,43	5,35	7,68	95,96
CP 6	0,20	2,54	7,88	98,50
CP 7	0,08	1,00	7,96	99,50
CP 8	0,04	0,50	8,00	100,00

A figura 09 apresenta a curva de autovalores, onde contata-se uma mudança no declive entre a 3^a e 4^a componentes. Aspecto que confirma a maior importância das 3 primeiras

componentes, justificando-se por isso uma maior ênfase dada a estas 3 componentes principais durante a discussão dos resultados.

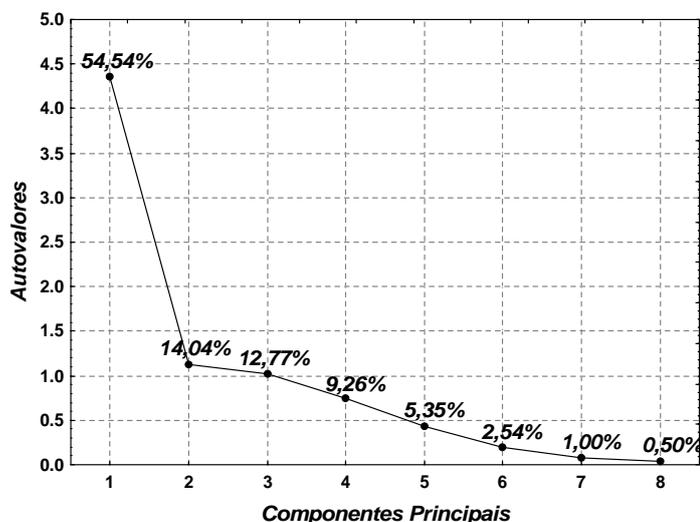


Figura 09. Gráfico dos autovalores e porcentagem de variância explicada das 8 componentes principais obtidas dos dados.

Com intuito de auxiliar a interpretação da ACP, foi montada a tabela 13, que contém as informações dos elementos-traço retidos em cada componente. Observa-se que a primeira componente contribuiu com 54,54 % da variância total dos dados, com as cargas mais elevadas para os elementos Co, Cu, Cr, Zn, Mn e Fe. A segunda componente contribuiu com 14,04 %, com a carga mais alta para o elemento Pb; e a terceira componente contribuiu com 12,77 %, com a carga mais alta para o elemento Hg.

Tabela 13. Contribuição de cada elemento-traço para as 3 componentes principais obtidas.

Variáveis	Componentes Principais		
	CP 1	CP 2	CP 3
Co	-0,955	-0,099	0,047
Cu	-0,876	0,166	0,012
Cr	-0,659	-0,411	0,058
Pb	-0,389	0,852	-0,008
Hg	0,023	-0,077	-0,991
Zn	-0,942	-0,019	0,026
Mn	-0,736	-0,371	0,011
Fe	-0,817	0,218	-0,179
% Variância explicada	54,54	14,04	12,77

A primeira componente é explicada pela maior correlação entre as variáveis Co, Cu, Cr, Zn, Mn e Fe. A obtenção dessa componente com a presença dos elementos Fe e Mn, ressalta a associação dos elementos-traço Co, Cu, Cr e Zn com os óxidos e hidróxidos de Fe e/ou Mn presentes nos solos. Este comportamento já foi observado por outros autores tais como: Pérez *et al.* (1997); Kabata-Pendias & Pendias (2001); Fadigas *et al.* (2002); Fadigas *et al.* (2006); Vendrame *et al.* (2007); Ramalho *et al.* (2000). A maior carga atribuída as variáveis dessa componente também está pautada na maior semelhança da composição natural de elementos-traço dos pontos que se influenciam pelos materiais de origem, características físico-químicas e possivelmente devido a menor vulnerabilidade a mudanças na cobertura dos solos. Devido aos fatores mencionados a primeira componente foi denominada “componente natural”.

A segunda componente é explicada apenas pelo elemento Pb. Esta componente é caracterizada pelas maiores concentrações de Pb nos solos, que foram encontradas principalmente nas amostras próximas a Br 364 e Br 425. Segundo a literatura (OLIVEIRA, 1996; MOURA *et al.*, 2006), as maiores concentrações de Pb próximas a rodovias e avenidas, podem ser atribuídas aos resíduos da combustão de gasolina contendo a substância anti-detonante - chumbo tetraetila (ocorrida no passado, pois o Brasil substituiu essa substância pelo álcool em 1992), ao desgaste de peças e borrachas, e aos aditivos e óleos que são liberados pelos veículos automotores. Este comportamento poderá ser observado melhor no item “4.4.2”, aonde se encontra um mapa temático com as concentrações de Pb nos solos ao longo do Alto rio Madeira (figura 13). Devido ao fator acima esta componente foi denominada “componente antrópica - malha viária”.

A terceira componente está relacionada com o elemento Hg. Esta componente principal é explicada pelo aumento nas concentrações de Hg devido às fontes antrópicas de inserção deste elemento na região (garimpo de ouro), que são responsáveis pela alteração pontual e não-pontual das concentrações do elemento Hg nos solos. Esta hipótese poderá ser melhor visualizada no item “4.4.1” que traz um mapa temático com a distribuição espacial das concentrações de Hg nos solos ao longo do Alto rio Madeira (figura 12). Desta forma esta componente foi determinada como “componente antrópica – garimpo de ouro”.

Observa-se na figura 10, que as variáveis geoquímicas se associam em grupos de maior correlação, onde o primeiro é formado pelas variáveis Cu e Fe; o segundo pelos elementos Mn e Cr; o terceiro pelos elementos Co e Zn; e elementos que não apresentaram correlação com os demais, a exemplo do Hg e Pb.

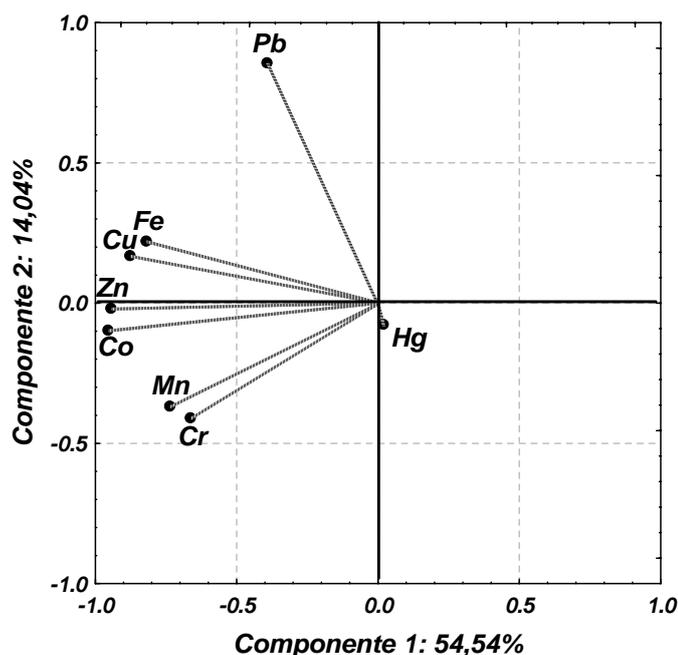


Figura 10. Projeção espacial de ordenação da carga dos elementos-traço na CP 1 versus CP 2.

Pela ordenação dos escores na CP 1 versus a CP 2 (figura 11), referentes aos pontos amostrados, foi possível observar a formação de grupos que se compõem de solos de diferentes classes pedológicas, formações geológicas e usos do solo. Este comportamento já era esperado, tendo em vista que solos pedologicamente diferentes podem apresentar alguns atributos químicos e de composição granulométrica em comum (EMBRAPA, 2006).

Além disso, a formação de grupos com solos de diferentes classes e formações, já haviam sido observada em alguns estudos anteriores (OLIVEIRA, 1996; PÉREZ *et al.*, 1997; RAMALHO *et al.*, 2000; FADIGAS *et al.*, 2002; LICHT & PLAWIAK, 2005; FADIGAS *et al.*, 2006). Portanto, apenas a concentração dos elementos-traço estudados não é suficiente para separar grupos com solos pertencentes a uma mesma classe, formação ou uso do solo, através da análise de componentes principais. Faz-se necessário o emprego de mais variáveis.

Na figura 11 é apresentada a ordenação dos pontos amostrados nas duas expedições em dois grupos distintos. Os pontos coletados na I expedição (P*, RM1, RA1, RJP1, exceto RMP1), período de vazante (22-11 a 25-11-2003), ficaram agrupados no “G-1” por apresentarem menores concentrações dos elementos-traço Co, Cu, Pb, Zn e Fe, e maiores concentrações de Hg, Cr e Mn. Já as amostras coletadas na II expedição (A*, RM2, RA2, IGA, IGB, RJP2 e RMP2), período de cheia (22-02 a 25-02-2004), ficaram agrupadas no “G-2” por apresentarem menores concentrações de Hg, Cr e Mn, e maiores concentrações de Co, Cu, Pb, Zn e Fe. Demonstrando que existe diferença nas concentrações dos elementos-traço estudados nos solos do Alto rio Madeira conforme o período sazonal.

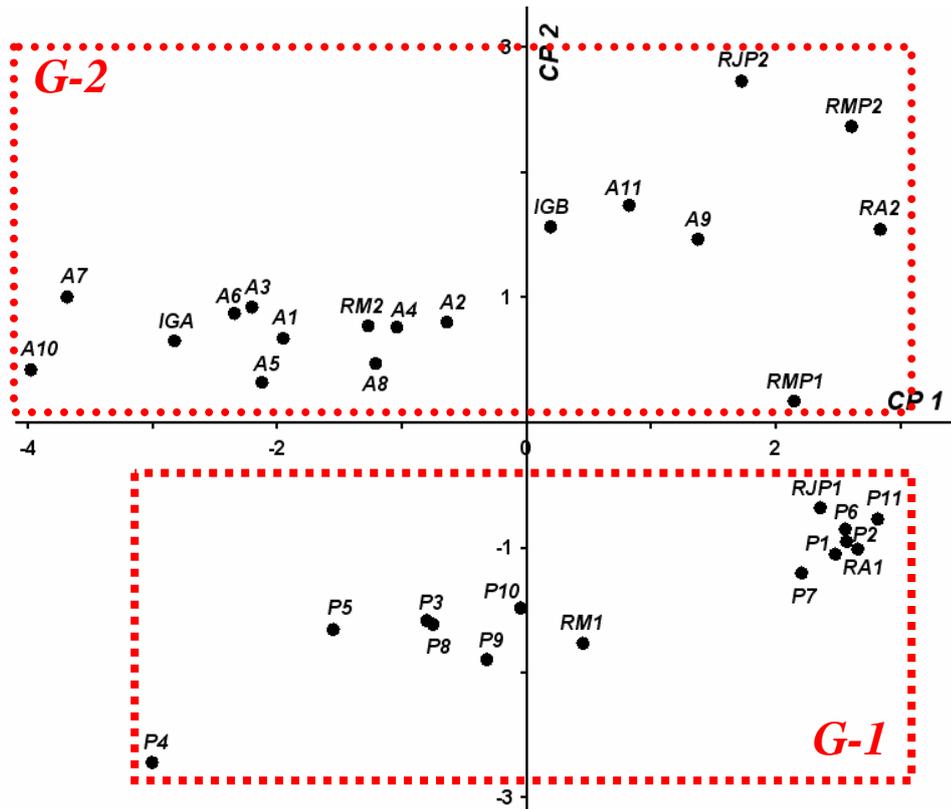


Figura 11. Projeção espacial de ordenação dos escores na CP 1 versus CP 2.

4.6. MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ELEMENTOS-TRAÇO DAS COMPONENTES ANTRÓPICAS

4.6.1. Mapas de distribuição espacial de Hg nos solos

Para analisar a distribuição espacial das concentrações de Hg ao longo do Alto rio Madeira (figura 12), foi levado em consideração o valor da mediana ($0,07 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) como a medida de tendência central das concentrações de Hg que ocorreram na região. Tendo em vista que a mediana, diferentemente da média aritmética, sofre menos influência dos valores extremos da matriz de dados. Usou-se como base também o levantamento das frentes garimpeiras realizado pelo Departamento Nacional da Produção Mineral -DNPM (BRASIL, 1983), onde constam os locais que foram intensivamente utilizados como áreas de garimpagem e para manutenção de balsas e dragas no período auge da mineração de ouro na Reserva garimpeira do Alto rio Madeira.

Na figura 12 observa-se que as menores concentrações de Hg encontradas na Sub-bacia do Alto rio Madeira estão na região dos pontos amostrados no rio Mamoré, local mais distante da área garimpeira. Posteriormente, constata-se um aumento médio na concentração

de Hg no ponto do Igarapé Araras, que fica próximo ao Setor Araras de garimpagem, seguido por uma diminuição até os pontos do Rio Abunã.

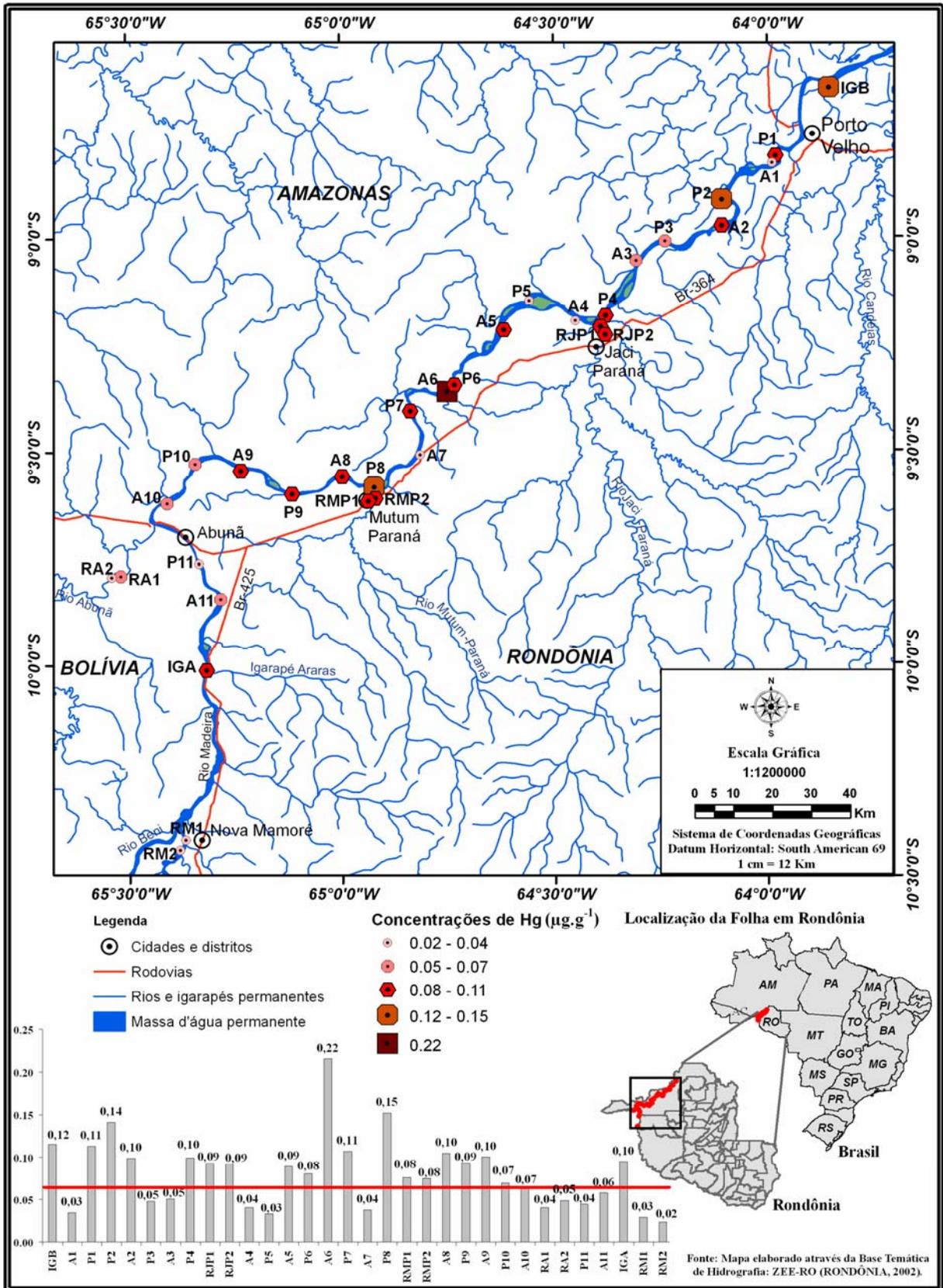


Figura 12. Mapa temático com a distribuição espacial das concentrações de Hg em solos ao longo do Alto rio Madeira.

A partir do ponto A10 observa-se um aumento significativo nas concentrações de Hg, principalmente nos pontos A9, P9, A8 e P8, que ficam próximos aos setores de garimpagem “Vai quem quer”, Dois Irmãos e do Rio Mutum-Paraná, respectivamente. No ponto A7 ocorre uma diminuição brusca da concentração de Hg, que deve estar relacionada ao fato desse solo ter sua cobertura natural convertida em pastagem.

Seguindo no sentido jusante, novamente é observado um aumento médio nas concentrações de Hg nos pontos P7, A6, P6 e A5, que ficam próximos aos setores de garimpagem Embaubá, Salto do Jirau e Caldeirão do Inferno, respectivamente. Ressalta-se que no ponto A6 foi encontrada a maior concentração de Hg ($0,22 \mu\text{g.g}^{-1}$). Nos pontos P4, RJP1 e RJP2 constata-se igualmente o aumento nas concentrações de Hg devido à proximidade com o rio Jaci-Paraná que é muito utilizado até hoje para manutenção de balsas e dragas de garimpo no período da seca.

Por fim, próximo à cidade de Porto Velho também ocorre o aumento nas concentrações de Hg, que deve estar relacionado ao Hg disponibilizado pelas lojas de ouro da cidade segundo Malm *et al.* (1991). Com exceção do ponto A1 que teve sua cobertura vegetal convertida para o uso na agricultura e pode ter contribuído para disponibilizar o Hg do solo.

Através da figura 12 se constata a existência de elevadas concentrações de Hg em alguns pontos de solos do Alto rio Madeira, que será local de implantação das Hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio. Estes empreendimentos ocasionarão uma série de fatores e processos, durante a execução, que poderão contribuir para a disponibilização do Hg retido nos solos. Subsidiando os processos de metilação (formação do composto Metil-Hg - forma mais tóxica do Hg), bioacumulação e biomagnificação do Hg ao longo da cadeia trófica aquática. Podendo assim, elevar os teores de Hg no pescado e, conseqüentemente, chegar até as populações tradicionalmente ribeirinhas que se alimentam dos peixes da região. Que apesar de não apresentarem sintomas aparentes de toxicologia mercurial, estas já possuem valores médios de Hg entre $0,36$ e $150,00 \mu\text{g.g}^{-1}$, conforme demonstrado por Bastos *et al.* (2006), que são muito superiores ao que orienta a OMS como concentração normal (até $6,00 \mu\text{g.g}^{-1}$).

As modelagens hidrológica e biogeoquímica, constantes no EIA/RIMA (2005) indicaram que estratificações termais e condições anóxicas poderão ocorrer frequentemente em alguns bolsões, que se formarão com o represamento da água pela barragem da UHE de Santo Antônio (nos igarapés Jatuarana e Mucuim) e UHE de Jirau (nos igarapés Jirau e Caiçara, e rios Mutum-Paraná e Cotia). Segundo Tundisi (RONDÔNIA, 2006), o aumento da taxa de sedimentação e da penetração de luz a montante dos reservatórios poderá desencadear uma rápida proliferação de algas, cianobactérias e macrófitas aquáticas nas regiões de

remansos, bolsões e braços dos futuros reservatórios. Estas condições poderão favorecer a atividade de bactérias metanogênicas, resultando em produções significativas de metil-Hg.

Avaliando-se os bolsões que serão formados pela UHE de Jirau, nos rios Mutum-Paraná e Cotia, exemplifica-se a grande problemática desta questão. As regiões próximas ao rio Mutum-Paraná e seu afluente rio Cotia, apresentam as maiores concentrações de Hg encontradas neste estudo (pontos P8 e A6), que estão relacionadas ao histórico de garimpagem. Segundo a modelagem hidrológica do empreendimento, no período de cheia, o Bolsão do Mutum-Paraná apresentará tempos de residência d'água elevados e qualidade da água deteriorada devido à grande quantidade de vegetação submersa, causando estratificações termais e condições anóxicas, que favorecem a produção de metano e processos de metilação.

4.6.2. Mapas de distribuição espacial de Pb nos solos

Para analisar a distribuição espacial das concentrações de Pb ao longo do Alto rio Madeira (figura 13) também se levou em consideração o valor da mediana ($7,12 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) como a medida de tendência central das concentrações de Pb que ocorreram na região.

De forma geral os pontos que ainda mantém a cobertura da floresta (RM2, IGA, A11, A10, A9, RMP1, RMP2, A6, A4 e RJP2), apresentam concentrações de Pb acima da concentração mediana de Pb encontrada na área de estudo. A exceção dos pontos A8, RJP1 e P4 que apresentaram concentrações próximas à mediana, e dos pontos P11, P9, P8, P7, P6, P5 e P3 que apresentaram concentrações abaixo da mediana.

Os pontos com cobertura da floresta RM2, IGA, A11, A10, RMP1, RMP2, A4 e RJP2, aonde se encontram as maiores concentrações de Pb nos solos da região estudada, sofrem a maior influência da proximidade com a Br 364 e Br 425. Pois, estes pontos ficam mais próximos destas rodovias.

Nos pontos aonde a cobertura florestal foi convertida para o uso da agricultura (RM1, P10, A5, A3 e P1) observam-se concentrações de Pb abaixo do valor mediano, a exceção dos pontos A3 e A5, que se diferenciaram dos demais pontos de agricultura por serem solos originados de Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos (Qpa). Já que os solos com cobertura de floresta e pastagem, originados de Qpa, também apresentaram maiores concentrações deste elemento em vista das demais formações geológicas.

Nos pontos aonde a cobertura florestal foi convertida para o uso de pastagem (RA1, RA2, A7, A2, P2, A1 e IGB) também se observam concentrações de Pb abaixo do valor

mediano, a exceção dos pontos A7, A1 e IGB. Estes últimos recebem influência da proximidade com a Br 364 e do fluxo de veículos da cidade de Porto Velho.

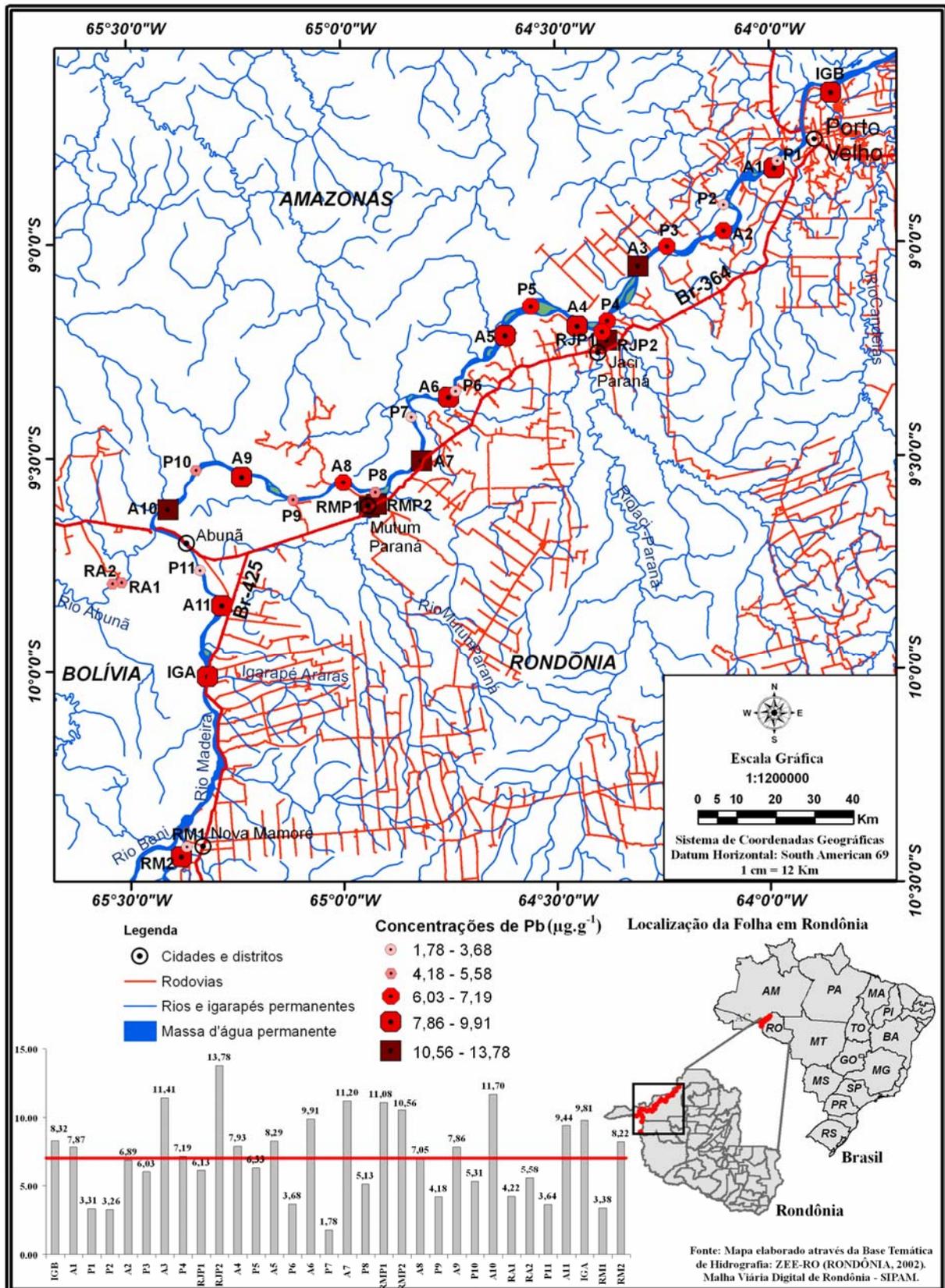


Figura 13. Mapa temático com a distribuição espacial das concentrações de Pb em solos ao longo do Alto rio Madeira.

CONCLUSÃO

O comportamento geoquímico específico que cada elemento-traço assume diante das condições ambientais e antrópicas é um grande desafio a se compreender. Pois, a heterogeneidade nas concentrações de elementos-traço dos solos está relacionada a diversos fatores, como os materiais de origem, características físicas e químicas, tipos de usos do solo e contribuições antrópicas. Levando-se em conta os objetivos assumidos na avaliação, juntamente com os resultados alcançados, o presente trabalho permite concluir que:

- No Alto rio Madeira as concentrações de elementos-traço nos solos estão em similaridade com os valores apresentados em condições naturais, exceto Hg, tendo em vista a comparação dos resultados obtidos com os valores orientadores de Referência de Qualidade (VRQ) e Prevenção (VP) da CETESB (2005), e os intervalos propostos por Fadigas *et al.* (2006), como valores de referência considerados normais para elementos-traço em solos brasileiros não poluídos;

- A análise de componentes principais das variáveis geoquímicas evidenciou alguns fatores que influenciam para a variabilidade encontrada nas concentrações de elementos-traço nos solos. Os principais fatores levantados foram o período sazonal e as contribuições antrópicas da garimpagem de ouro e dos resíduos automobilísticos às margens das rodovias. Porém, estudos mais detalhados devem ser desenvolvidos a fim de se avaliar o *background* regional de elementos-traço nos solos e assim quantificar melhor as contribuições antrópicas;

- Os mapas temáticos de distribuição espacial dos elementos-traço das componentes antrópicas, Hg e Pb, ajudaram a demonstrar as influências exercidas pelas áreas de maior atividade garimpeira como fontes para o aumento nas concentrações de Hg, e pelos resíduos automobilísticos gerados nas rodovias Br 364 e Br 425 para o aumento de Pb nos pontos mais próximos. Contribuindo assim para as alterações em torno da média regional desses elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira.

Ressalta-se que é de fundamental importância o aprofundamento dos estudos biogeoquímicos no Alto rio Madeira, haja vista as transformações que ocorrerão nessa região devido aos projetos hidroelétricos das cachoeiras de Santo Antônio e Jirau. Contribuindo para mitigar ao máximo os futuros impactos ambientais, prevenindo possíveis riscos à saúde humana através da contaminação da água para consumo, do estoque pesqueiro que é a fonte protéica primária da população ribeirinha amazônica, dos produtos agrícolas produzidos em culturas perenes nas várzeas nos períodos de seca, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.D., LACERDA, L.D., BASTOS, W.R., HERRMANN, J.C., 2005. *Mercury loss from soils following conversion from forest to pasture in Rondônia, Western Amazon, Brazil*. Environmental Pollution, 137:179-186.

AMARAL-SOBRINHO, N.M.B., COSTA, L.M., OLIVEIRA, C., VELLOSO, A.C.X., 1992. *Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos*. Revista Brasileira de Ciências do Solo, 16: 271-276.

APHA, 1971. America Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, D.C. 873 pg.

ArcGIS - ESRI Inc., 1999-2008. *Leica Geosystems GIS Mapping, LLC. ArcMap, versão 9.0*. <http://www.ESRI.com.br>

AULA, I., BRAUNSCHWEILER, H., LEINO, T., MALIN, I., PORVARI, P., HATANAKA, T., LODENIUS, M., JURAS, A., 1994. *Levels of mercury in the Tucuruí reservoir and its surrounding area in Pará, Brazil*. Mercury Pollution: toward integration and synthesis. Lewis publ.: 21-40.

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*. Science and Cultural Journal of the Brazilian. 50: 255-260.

BASTOS, W.R., LACERDA, L.D., 2004. *A contaminação por mercúrio na bacia do rio Madeira: uma breve revisão*. Geochimica Brasiliensis, 18(2): 99-114.

BASTOS, W.R., GOMES, J.P.O, OLIVEIRA, R.C., ALMEIDA, R., NASCIMENTO, E.L., LACERDA, L.D., SILVEIRA, E.G., PFEIFFER, W.C., 2006, *Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil*. The Science of the Total Environment, 368 (01): 344-351.

BERNARDI, J.V., FOWLER, H.G., LANDIM, P.M.B., 2001. *Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada*. Holos Environmental, 1(2): 162-172.

BONOTTO, D.M., SILVEIRA, E.G., 2003. *Preference rations for mercury and other chemical elements in the Madeira River, Brazil*. Journal of South American Earth Science, 15: 911-923.

BRASIL, 1983. Departamento Nacional da Produção Mineral. *Garimpos do Brasil*. Coord. SCHMALTZ, W.H. & GUIMARÃES, G. Brasília: DNPM, Avulso 5, 378 pg.

CAMPOS, M.L., PIERANGELI, M.A.P., GUILHERME, L.R.G., MARQUES, J.J., CURI, N., 2003. *Baseline concentrations of heavy metals in Brazilian Latosols*. Communications in Soil Science Plant Analysis, 34(3&4): 547-557.

CETESB, 1987. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Guia de coleta e preservação de amostras de água e solos* /Coord, Edmundo Garcia Agudo(et al.) São Paulo: CETESB, 197 pg.

CETESB, 2005. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Decisão da Diretoria nº. 195/2005-E de 23 de novembro de 2005*. São Paulo. http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf. Acesso em 04 de Fevereiro de 2008.

EIA-RIMA, 2005. *Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) dos Aproveitamentos Hidrelétricos Santo Antonio e Jirau, no Rio Madeira-RO*. Tomos A, B, C, D, E. Furnas, Odebrecht. Consultado em 10/06/07.

EMBRAPA, 2006. *Sistema Brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro: 2ª ed., 306 p.

FADIGAS, F.S., SOBRINHO, N.M.B.A, ANJOS, N.M.L.H.C, FREIXO, A.A., 2002. *Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros*. *Bragantia*, 61(2): 151-159.

FADIGAS, F.S., SOBRINHO, N.M.B.A, ANJOS, N.M.L.H.C, FREIXO, A.A., 2006. *Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(3): 699-705.

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.

FERNANDES, R.B.A., LUZ, W.V., FONTES, M.P.F., FONTES, L.E.F., 2007. *Avaliação da concentração de metais pesados em áreas olerícolas no Estado de Minas Gerais*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(1): 81-93.

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.

GOMES, J.P.O., SILVEIRA, E.G., BASTOS, W.R., 2003a. *Levantamento da presença de poluentes metálicos no rio Madeira e seus afluentes*. In: XII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho. Cd de resumos expandidos do XII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Rondônia.

GOMES, J.P.O., LINHARES, D.P., BASTOS, W.R., SILVEIRA, E.G., 2003b. *Hidrobiogeoquímica de elementos-traço em lagos de várzea no Baixo rio Madeira - Amazônia*. In: IX Congresso Brasileiro de Geoquímica, Belém - PA. Livro de Resumos do IX Congresso Brasileiro de Geoquímica.

GOMES, J.P.O., SILVEIRA, E.G., BASTOS, W.R., 2004. *Hidrobiogeoquímica de elementos-traço na bacia de drenagem do rio Madeira*. In: XIII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho. Cd de Resumos Expandidos do XIII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Rondônia.

GOMES, J.P.O., NASCIMENTO, E.L., BASTOS, W.R., BERNARDI, J.V.E., 2009. *Geoquímica de elementos-traço em sólidos em suspensão no Alto rio Madeira, Rondônia, Brasil*. *Geochimica Brasiliensis (Rio de Janeiro)*, 23(1): 49-65.

GUILHERME, L.R.G., MARQUES, J.J., PIERANGELI, M.A.P., ZULIANI, D.Q., CAMPOS, M.L., MARCHI, G., 2005. *Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos*. *Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa*, 4: 345-390.

KABATA-PENDIAS, A., PENDIAS, H., 2001. *Trace elements in soils and plants*, 3rd ed, Boca Raton, CRC Press, 413p.

LACERDA, L.D., PFEIFFER, W.C., SILVEIRA, E.G., BASTOS, W.R., SOUZA, C.M.M., 1987. *Contaminação por mercúrio na Amazônia: Análise preliminar do Rio Madeira, RO*. In: Anais do I Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2: 295-299.

LACERDA, L.D., PAULA, F.C.F., OVALLE, A.R.C., PFEIFFER, W.C., MALM, O, 1990. *Trace metals in fluvial sediments of the Madeira river watershed, Amazon, Brazil*. *The Science of the Total Environment*, 97/98: 525-530.

LACERDA, L.D., SOUZA, M., RIBEIRO, M.G., 2004. *The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon*. *Environmental Pollution*, 129: 247-255.

LANDIM, P.M.B., 2000. *Análise estatística de dados geológicos multivariados*. Lab. Geomatemática, DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 128 pp. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em: 23/01/05.

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 Science of the Total Environment*, 260: 87-96.

LICHT, O.A.B., PLAWIAK R.A.B., 2005. *Geoquímica de solo - Horizonte B: Relatório final de projeto - Levantamento geoquímico multielementar do Estado do Paraná*. Curitiba: Mineropar, Vol. 1, 411p.

MALM, O., PFEIFFER, W.C., SOUZA, C.M.M., 1991. *Main pathways of mercury in the Madeira River área, Rondônia, Brazil*. In: Proc. 8th International Conference Heavy Metals in the Environment, Edingburgh/UK, 515-518.

MARQUES, J.J., SCHULZE, D.G., CURI, N., MERTZMAN, S.A., 2004. *Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils*. Geoderma, 121: 31-43.

MARQUES, J.J.G.S.M., 2000. *Trace element distributions at the landscape and micrometer scales*. Tese de Doutorado. Purdue University, 183p.

MARTINELLI, L.A.; FERREIRA, J.R.; FORSBERG, B.R. & VICTORIA, R.L., 1988. *Mercury contamination in the Amazon: A gold rush consequence*. Ambio 17: 252-254.

MAURICE-BOURGOIN, L., QUIROGA, I., CHINCHEROS, J., COURAU, P., 2000. *Mercury distribution in waters and fishes of the upper Madeira River and mercury exposure in riparian Amazonian populations*. The Science of the Total Environment, 260: 73-86.

McBRIDE, M.B., 1994. *Environmental chemistry of soils*. New York, Oxford University Press, Inc, 406p.

MENDHAN, J., DENNEY, R.C., BARNERS, J.D., THOMAS, M.J.K., 2002. *VOGEL, Análise Química Quantitativa*, Rio de Janeiro, ed. Guanabara Koogan S.A., 6^a ed., 462 pg.

MOURA, M.C.S., LOPES, A.N.C., MOITA, G.C., NETO, J.M.M., 2006. *Estudo multivariado de solos urbanos da cidade de Teresina*. Química Nova, 29(3): 429-435.

NRIAGU, J.O., PACYNA, J.M., 1988. *Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals*. Nature, 333: 134-139.

OLIVEIRA, T.S., 1996. *Metais pesados como indicadores de materiais de origem de solos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 129p.

PÉREZ, D.V., SALDANHA, M.F.C., MENEGUELLI, N.A., MOREIRA, J.C., VAITSMAN, D.S., 1997. *Geoquímica de alguns solos brasileiros*. Pesquisa em Andamento CNPS, Rio de Janeiro, 4: 1-14.

PFEIFFER, W.C., LACERDA, L. D., 1988. *Mercury inputs to the Amazon region, Brazil*. Environment Technology. 9: 325-350.

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 areas in Rondônia, Brazil*. The Science of the Total Environment. 87/88: 230-240.

RAMALHO, J.F.G.P, SOBRINHO, N.M.B.A, VELLOSO, A.C.X., 2000. *Contaminação da microbacia de Caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 35(7): 1289-1303.

RONDÔNIA, Governo do Estado de Rondônia, 2002. *2^a Aproximação do Zoneamento Sócio-Econômico e Ecológico do Estado de Rondônia (ZSEE-RO)*. Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral (SEPLAN/RO). Porto Velho-RO.

RONDÔNIA, 2006. Ministério Público do Estado de Rondônia. *Relatório de Análise do Conteúdo dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Santo Antônio e Jirau no Rio Madeira, Estado de Rondônia. Pareceres técnicos dos especialistas setoriais Aspectos Físicos e Bióticos*. Porto Velho, 2 Vols. Consultado em 08/06/07.

ROULET, M., LUCOTTE, M., SAINT-AUBIN, A., TRAN, S., RHEAULT, I., FARELLA, N., DE JESUS, E.S., DEZENCOURT, J., SOUSA PASSOS, C.J., SANTOS-SOARES, G., 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*. Science of Total Environment, 223:1-24.

SEDAM, Secretaria Estadual de Desenvolvimento Ambiental, 2002. *Atlas Geoambiental de Rondônia*, Porto Velho-RO, 146 pg.

STATISTICA - StatSoft Inc., 2001. *STATISTICA: data analysis software system, versão 7.0*. <http://www.statsoft.com>.

VENDRAME, P.R.S., BRITO, O.R., QUANTIN, C., BECQUER, T., 2007. *Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 42(6): 859-864.

WASSERMAN, J.C., HACON, S.S., WASSERMAN, M.A., 2001. *O ciclo do mercúrio no ambiente amazônico*. Mundo & Vida, 2 (1/2): 46-53.

APÊNDICE

Apêndice 01. Matriz de dados com as concentrações de elementos-traço nos solos do Alto rio Madeira, bem como as demais informações levantadas de cada ponto de coleta. Elementos-traço em $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (ppm). Coordenadas geográficas em UTM – Projeção Universal Transversa de Mercator. Datum Horizontal – South American 1969.

PONTO	X	Y	[CD]	[CO]	[CU]	[CR]	[PB]	[HG]	[ZN]	[MN]	[FE]	PEDOLOGIA	GEOLOGIA	VEGETAÇÃO	USO DO SOLO
A1	391938	9026334	<LDT	6,93	12,48	6,88	7,87	0,03	77,52	415,98	24728,43	Cambissolos	Suíte Intrusiva Teotônio	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Pastagem
A2	378387	9007843	<LDT	5,06	5,00	3,37	6,89	0,10	52,98	975,71	25218,81	Latossolos Amarelos	Suíte Intrusiva Teotônio	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Pastagem
A3	356399	8998783	<LDT	5,62	11,95	9,57	11,41	0,05	79,88	221,21	26106,32	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Agricultura
A4	340762	8983089	<LDT	6,82	10,71	7,16	7,93	0,04	59,20	224,45	19662,20	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
A5	322304	8980660	<LDT	8,16	7,45	6,22	8,29	0,09	95,35	837,55	21266,08	Latossolos Vermelho-Amarelos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Agricultura
A6	307822	8964723	<LDT	8,06	10,63	7,72	9,91	0,22	81,42	337,52	31789,13	Gleissolos	Grupo Palmeiral - São Lourenço	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
A7	300922	8948295	<LDT	10,22	13,42	8,23	11,20	0,04	82,06	457,59	41294,75	Latossolos Vermelho-Amarelos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Pastagem
A8	280794	8942610	<LDT	8,74	8,19	6,51	7,05	0,10	64,25	420,47	21327,54	Areias Quartzosas	Grupo (Meta) Vulcano-Sedimentar Mutumparaná-Roosevelt	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
A9	254733	8943964	<LDT	0,39	5,53	5,85	7,86	0,10	20,33	21,68	20151,21	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
A10	235823	8935433	<LDT	10,07	14,45	11,21	11,70	0,07	75,00	463,03	38310,56	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
A11	249615	8910697	<LDT	0,19	6,77	6,39	9,44	0,06	16,88	31,43	26853,70	Latossolos Amarelos	Coberturas Quaternárias-Neogênicas (indiferenciadas)	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
P1	392230	9026050	<LDT	<LDT	4,58	7,23	3,31	0,11	7,94	86,73	12696,86	Cambissolos	Suíte Intrusiva Teotônio	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Agricultura
P2	378359	9014709	<LDT	<LDT	2,49	6,88	3,26	0,14	9,77	67,76	17282,28	Latossolos Amarelos	Terraços Fluviais Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Pastagem
P3	363851	9003815	<LDT	5,24	8,78	9,02	6,03	0,05	60,41	597,56	18989,04	Latossolos Amarelos	Suíte Intrusiva Teotônio	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
P4	348504	8984412	0,09	10,98	7,36	12,46	7,19	0,10	86,04	1000,98	24803,29	Latossolos Vermelho-Amarelos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
P5	328917	8988245	<LDT	7,26	11,16	10,38	6,33	0,03	62,17	422,10	24344,32	Latossolos Vermelho-Amarelos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Formacao Pioneira Fluvial Arbustiva	Floresta
P6	308981	8965970	<LDT	0,36	3,04	6,57	3,68	0,08	15,60	66,12	13151,18	Gleissolos	Grupo Palmeiral - São Lourenço	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
P7	298293	8959639	<LDT	<LDT	8,31	6,96	1,78	0,11	7,70	63,03	13271,98	Gleissolos	Grupo Palmeiral - São Lourenço	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
P8	288626	8938229	<LDT	5,98	9,14	9,42	5,13	0,15	63,01	326,83	22703,48	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Formacao Aluvial de Umirizal	Floresta
P9	267903	8938006	<LDT	6,29	6,47	9,06	4,18	0,09	51,48	518,62	19930,76	Latossolos Amarelos	Grupo (Meta) Vulcano-Sedimentar Mutumparaná-Roosevelt	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
P10	242966	8945723	<LDT	5,83	6,27	8,54	5,31	0,07	52,59	404,89	17581,58	Latossolos Amarelos	Granitos Rapakivi Jovens de Rondônia	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Agricultura
P11	243983	8919880	<LDT	0,70	2,25	5,61	3,64	0,04	20,67	112,04	7639,70	Cambissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
IGA	245902	8892268	<LDT	8,49	12,60	8,75	9,81	0,10	72,19	413,19	34178,66	Latossolos Vermelho-Amarelos	Supergrupo Gnaiss Jarú	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
IGB	405851	9043871	<LDT	0,98	7,91	6,56	8,32	0,12	20,36	46,15	36804,50	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta de Terras Baixas	Pastagem
RA1	223536	8916920	<LDT	0,86	1,81	7,54	4,22	0,04	17,29	36,27	8508,51	Latossolos Vermelho-Amarelos	Granitos Rapakivi Jovens de Rondônia	Formação Pioneira Fluvial Arbórea	Pastagem
RA2	223910	8916578	<LDT	<LDT	2,38	3,32	5,58	0,05	7,04	19,75	10957,91	Latossolos Vermelho-Amarelos	Granitos Rapakivi Jovens de Rondônia	Formação Pioneira Fluvial Arbórea	Pastagem
RJP1	347742	8980928	<LDT	0,79	2,82	7,26	6,13	0,09	27,57	57,01	6649,46	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta de Terras Baixas	Floresta
RJP2	347791	8980086	<LDT	0,74	3,39	4,07	13,78	0,09	28,70	21,50	8207,10	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Pleistocênicos	Floresta Ombrofila Aberta de Terras Baixas	Floresta
RMP1	289183	8937448	<LDT	0,93	1,59	7,49	11,08	0,08	22,26	40,37	7599,96	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
RMP2	289163	8937169	<LDT	0,44	2,54	3,06	10,56	0,08	15,92	17,75	4002,88	Gleissolos	Sedimentos Aluvionares e Coluvionares Holocênicos	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta
RM1	240713	8848121	<LDT	4,52	5,79	8,53	3,38	0,03	47,49	393,47	16279,67	Podzólicos Vermelho-Amarelos	Supergrupo Gnaiss Jarú	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Agricultura
RM2	239266	8845526	<LDT	7,72	7,90	7,31	8,22	0,02	57,52	290,05	27761,85	Podzólicos Vermelho-Amarelos	Supergrupo Gnaiss Jarú	Floresta Ombrofila Aberta Submontana	Floresta

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)