



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**SEDIMENTOLOGIA, MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS  
SEDIMENTOS DO PÂNTANO MAURITIA NA SERRA SUL,  
CARAJÁS (PARÁ)**

**Dissertação apresentada por:**

**ALIANE TRINDADE CARVALHO**

**Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)**

---

**BELÉM  
2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

C331s Carvalho, Aliane Trindade  
Sedimentologia, mineralogia e geoquímica dos sedimentos do  
pântano Mauritia na Serra Sul, Carajás (Pará) / Aliane Trindade  
Carvalho; Orientador, Marcondes Lima da Costa. – 2010  
xvii, 129 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Programa  
de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de  
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

1. Geoquímica – Carajás, Serra dos (PA). 2. Mudanças  
paleoambientais. 3. Ambientes lacustres. I. Costa, Marcondes Lima  
da, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20. ed.: 551.9098115

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**SEDIMENTOLOGIA, MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS  
SEDIMENTOS DO PÂNTANO MAURITIA NA SERRA SUL,  
CARAJÁS (PARÁ)**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR  
ALIANE TRINDADE CARVALHO**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de aprovação: 06 / 10 / 2010

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. MARCONDES LIMA DA COSTA  
(Orientador-UFGPA)

---

Prof. Dr. HERMANN BEHLING  
(Membro – Universität Göttingen, Alemanha)

---

Prof. Dr. RÔMULO SIMÕES ANGÉLICA  
(Membro - UFGPA)

**A Deus, aos meus pais (Maria de Fátima e Advaldo), Shirlaine e Dyenna (irmãs), Julia (sobrinha) e a todos aqueles que sempre estão me incentivando.**

## AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para conclusão desta dissertação e em especial:

A Deus por todos os recursos básicos à sustentação da vida.

Ao Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa, orientador deste trabalho, pela oportunidade, compreensão, por sua dedicação ao trabalho continuado e de detalhe em todos os momentos desta dissertação, para que pudesse se tornar uma realidade.

A Mônia Carvalho pelo apoio prestado na formatação de figuras e tabelas auxiliando desta forma para melhor interpretação e discussão dos resultados.

Aos meus pais, Maria de Fátima Carvalho e Advaldo de Carvalho, pelo incentivo através do trabalho, da honestidade, bom senso e dedicação em todos os momentos de minha existência.

As minhas queridas irmãs, Shirlaine Carvalho e Dyenna Carvalho pelo incentivo e compreensão nos momentos que sempre precisei.

A minha sobrinha Julia pelo carinho e alegria contagiante.

Aos meus familiares pelo incentivo e acolhimento nos momentos que necessitei.

Ao MSc. Henrique Almeida, MSc. Socorro Progene, MSc. Ecilene, MSc. Marlis, Dr. Berredo pela amizade, paciência e conhecimento transmitido.

Ao Natalino pelo conhecimento compartilhado nas análises de matéria orgânica, e aos amigos Anderson e Alessandra pelo auxílio na execução desta etapa do trabalho no laboratório.

Aos amigos devotados Josiane, Macris, Vivian, Glayce, Josinete, Ana Áurea, Gilberto, Bruno Apolo, Milena, Alciney, Flávia, Luis, Sérgio e Flávio pelo incentivo e companhia nos momentos de descontração.

Ao CNPq pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudos nível mestrado e financiamento das pesquisas através de projetos (AGEOPAM – Processo 471949-2006-0, TPA processo 484986-2007-4 e taxa de bancada ao orientador processo 307901-2006-8); ao IBAMA pela permissão de acesso a área e a companhia VALE, pelo apoio total no campo e aos empregados de empresas terceirizadas que acompanharam esses trabalhos; ao Prof. Dr. Hermann Behling que com o Prof. Dr. Marcondes Costa fizeram o árduo trabalho de sondagem no pântano Mauritia.

*“O grande segredo da plenitude  
é muito simples: compartilhar”.*

***Sócrates***

## RESUMO

Lagos e sedimentos lacustres de pequeno porte são frequentes em terrenos com crostas lateríticas ferruginosas na região Amazônica, que se apresentam como importantes registros de mudanças paleoambientais dessa região. Em Carajás esses sedimentos se apresentam em grande profusão, tanto na Serra Norte como na Sul, e já foram objetos de pesquisas, que se concentraram em estudos palinológicos, com poucas informações as características mineralógicas e químicas. O presente trabalho empregou as técnicas sedimentológicas, mineralógicas, químicas, de radiocarbono e isotópicas para investigar esses sedimentos em uma área conhecida como pântano Mauritia na Serra Sul, Carajás, no Sul do Pará. Com auxílio de sonda manual do tipo Livingstone coletou-se uma sequência sedimentar de 466 cm. De acordo com as variações litológicas possíveis e sua relação com a profundidade estabeleceram-se os intervalos para amostragem totalizando em 23 amostras para realização das seguintes análises: granulométrica por laser granulômetro, mineralógica por DRX, micromorfológica por MEV/SED, quantificação e identificação da matéria orgânica, respectivamente, pelo Método de Walkley-Black e FTIR, química total, carbono orgânico e inorgânico, isotópica do  $\delta^{13}\text{C}$  (na matéria orgânica e carbonato) e  $\delta^{18}\text{O}$  (em carbonato) e datação por radiocarbono. A sequência apresenta sedimentos de aspecto argiloso a silto-argilosos, em parte distribuídos por diferentes camadas, indicadas por variação na coloração (tons de marrons e cor cinza) destacando-se dois ciclos sedimentares que iniciaram a sua deposição há pelo menos 52.000 anos AP. São sedimentos predominantemente silticos, com pouca areia fina e maior contribuição da fração argila com tamanho médio dos grãos variando de 9,6 a 52,3  $\mu\text{m}$  e diâmetro médio (50%) em torno de 33  $\mu\text{m}$ . São sedimentos constituídos por quartzo, opala, caulinita, goethita, siderita, anatásio, além de presença esporádica de gibbsita, barita, talco e/ou clorita, distribuindo-se na sequência de forma extremamente diferenciada. Espículas silicosas e amorfas (opala) de cauxi bem como indícios de diatomáceas, concentram-se nos 138 cm de sedimento mais recente. Os teores de matéria orgânica carbonosa ( $\text{C}_{\text{org}}$ ) são elevados, variam de 3,39 a 89,6% com média de 49,08%, correspondentes aos altíssimos valores de PF, ou seja, 50 % dos sedimentos são constituídos de matéria orgânica carbonosa. A fração restante está representada por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  distribuídos ao longo da sequência com grandes variações nos teores bem como os teores de elementos-traços. Da mesma forma a quase ausência de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , são também características intrínsecas dos sedimentos do pântano Mauritia. Essa composição química não guarda qualquer semelhança com a composição de rochas crustais e

muito menos com os folhelhos, só encontram paralelo em formações de crostas lateríticas ferro-aluminosas. Os resultados isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  indicam, ao lado dos dados mineralógicos e do conteúdo de MO, que a sedimentação ocorreu em diferentes condições climáticas variando de semi-áridas a úmidas e quentes, constituídas por plantas fisiologicamente e ecologicamente distintas. Os dados sedimentológicos, mineralógicos, geoquímicos, radiocarbônicos e isotópicos permitiram concluir que a região de Carajás passou por mudanças climáticas acentuadas de semi-árida a úmidas e quentes a partir do Pleistoceno Tardio.

**Palavras-chave: Mudanças Paleoambientais, ambiente lacustre, Amazônia, Carajás.**

## ABSTRACT

Lakes and lake sediments are frequently in terrain with ferruginous lateritic crusts in the Amazon region, which present themselves as important records of paleoenvironmental changes in this region. These sediments can be found in great profusion in Carajas, either in Serra Norte as in the Serra Sul, and have been objects of research, which focused on palynological studies, with little information on the mineralogical and chemical characteristics. This study employed the techniques of sedimentology, mineralogy, geochemistry, stable isotopes and radiocarbon to investigate these sediments in an area known as Mauritia swamp in Serra Sul, Carajas, in the south of Pará. A 466 cm sedimentary sequence has been drilled with the aid of a hand core probe type Livingstone. According to the lithological variations and their possible relationship with depth ranges 23 samples have been taken and submitted to the following analysis: particle size by laser particle sizer, XRD mineralogy, micromorphology by SEM/EDS, quantification of the matter organic, respectively, by method of Walkley-Black and FTIR, organic and inorganic carbon,  $\delta^{13}\text{C}$  (organic matter and carbonate) and  $\delta^{18}\text{O}$  (carbonate) and radiocarbon dating. The sequence shows a silt-clay aspect, in alternated layers, indicated by variation in color (shades of brown and gray) highlighting two sedimentary cycles that started its deposition for at least 52,000 years BP. Sediments are predominantly silty, with a little fine sand and clay largest contribution with average grain size ranging from 9.6 to 52.3  $\mu\text{m}$  and average diameter (50%) around 33  $\mu\text{m}$ . Sediments are composed of quartz, opal, kaolinite, goethite, siderite, anatase, and sporadic presence of gibbsite, barite, talc and/or chlorite. And amorphous siliceous spicules (opal), cauxi, as well as diatom fragments, are concentrated in upper 138 cm. The contents of carbonaceous organic matter ( $C_{\text{org}}$ ) are high, ranging from 3.39 to 89.6% with an average of 49.08%, corresponding to very high LOI values. The remaining fraction is represented by  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  distributed along the sequence with large variations after the distinct sediment layers. Likewise, the near absence of  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{CaO}$ , are also inherent characteristics of the sediments of Mauritia swamp. This chemical composition does not store any similarity to the composition of crustal rocks and much less with the shales, only matched the iron-aluminous lateritic crusts. The isotopic composition of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  indicate, beside the mineralogical data and content of OM, that sedimentation occurred under different climatic conditions ranging from semi-arid to humid and warm, made of plants physiologically and ecologically distinct. The sedimentological, mineralogical, geochemical, radiocarbon and stable isotopic data indicated that the Carajas region has

experienced marked climatic changes of semi-arid to humid and hot from the late Pleistocene to Present.

**Key words: Paleoenvironmental changing, lacustrine sedimentation, Amazon region, Carajas.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Mapa de localização do pântano Mauritia e imagem de satélite mostrando o relevo de quase-platô desprovido de floresta e coberto por savana arbustiva e graminosa. Na foto abaixo se observam às árvores de buritis e o canal raso, por onde flui a água durante o período chuvoso. E neste local foi realizada a amostragem. \_\_\_\_\_ 4
- Figura 2 – Na foto (A) destaca-se uma visão geral da depressão subcircular pântano Mauritia e de forma detalhada, na foto (B), visualiza-se um ambiente tipicamente pantanoso. \_\_\_\_\_ 5
- Figura 3 – Visualização da vegetação típica da Serra dos Carajás. \_\_\_\_\_ 7
- Figura 4 – Visualização destacando uma das vegetações típicas da Serra dos Carajás, o junco. \_\_\_\_\_ 7
- Figura 5 – Precipitação anual (mm/ano) da Amazônia Brasileira com destaque para o “corredor seco” (faixa em branco), onde as precipitações não ultrapassam 1750 (Adaptado de Siffedine 2001 e Filho *et al.* 2003). \_\_\_\_\_ 8
- Figura 6 – Mapa geológico da região dos Carajás no Estado do Pará. Adaptado de Vasquez *et al.* (2008). \_\_\_\_\_ 10
- Figura 7 – Coleta de sedimentos do pântano Mauritia com auxílio de sonda manual tipo *Livingstone*. \_\_\_\_\_ 12
- Figura 8 – Imagem mostrando o material testemunhado no intervalo de 1 à 3,00 m, já transferidos para o tubo de PVC (*polivinil-clorine*). \_\_\_\_\_ 12
- Figura 9 – Fluxogramas das diferentes etapas desenvolvidas com as amostras do perfil pântano Mauritia. \_\_\_\_\_ 14
- Figura 10 – Laser granulômetro sedígrafo Quantachrom-Cilas 920 do Institut fuer Geowissenschaften da Uni Halle. Na tela observam-se os diferentes gráficos com curvas de distribuição no momento da análise (Imagem: Marcondes Lima da Costa). \_\_\_\_\_ 15
- Figura 11 – Representação da análise granulométrica com sedígrafo Cilas 920 e *software (The Particle Expert)*. Modificado do site [www.cilasus.com](http://www.cilasus.com) (Carvalho 2006). \_\_\_\_\_ 16
- Figura 12 – Diagrama de combustão de amostra em um analisador elementar (Carvalho 2006). \_\_\_\_\_ 20
- Figura 13 – Diagrama das etapas de funcionamento do espectrômetro de massa por aceleração (AMS-facility) da Universidade de Erlangen (Carvalho 2006). \_\_\_\_\_ 20
- Figura 14 – Descrição da sucessão de sedimentos do pântano Mauritia: VM 1 - desenho representativo da imagem digital; VM 2 - imagem digital do perfil; CDO - camada detritos orgânicos; CES - camada escura superior; CMS - camada marrom superior; CEI - camada escura inferior; CMI - camada marrom inferior. \_\_\_\_\_ 23

Figura 15 – Intervalos do perfil do pântano Mauritia destacando os contatos abruptos e os de transição entre as camadas e o bandamento das camadas. \_\_\_\_\_24

Figura 16 – Perfil quimoestratigráfico com a distribuição das idades de radiocarbono para o pântano Mauritia. \_\_\_\_\_26

Figura 17 – Distribuição granulométrica da sucessão sedimentar do pântano Mauritia ressaltando através de curva acumulativa a predominância de areia fina e silte. O diâmetro médio de 50% é de 33  $\mu\text{m}$ . \_\_\_\_\_28

Figura 18 – Distribuição granulométrica na sucessão sedimentar do pântano Mauritia no intervalo 0-250 cm, destacando duas camadas com padrões de distribuição distintos. Os 155 cm de sedimento a partir do topo apresentam grãos de diâmetro médio de 50% de 29  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição unimodal. O intervalo 155-230 cm apresenta grãos de diâmetro médio de 50% de 15,1  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição polimodal. \_\_\_\_\_29

Figura 19 – Distribuição granulométrica na sucessão sedimentar do pântano Mauritia no intervalo 250-466 cm, destacando duas camadas com padrões de distribuição distintos. O intervalo 250-415 cm apresenta grãos de diâmetro médio de 50% correspondente a 36,2  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição unimodal. O intervalo 415-466 cm apresenta grãos de diâmetro médio de 50% correspondente a 11,7  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição polimodal. \_\_\_\_\_30

Figura 20 – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente a 100 cm a partir do topo. Similaridade na distribuição de silte e areia fina, com predominância da fração silte. \_31

Figura 21 – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 100-200 cm. No intervalo 100-150 cm a fração predominante é silte, seguido de um intervalo (150-200 cm) constituído de um material silto-argiloso. \_\_\_\_\_32

Figura 22 – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 200-300 cm. O intervalo 200-250 cm é constituído por um material silto-argiloso e no intervalo 250-300 a fração predominante é silte. \_\_\_\_\_33

Figura 23 – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 300-400 cm. A fração predominante neste intervalo é síltica. Observa-se um aumento dos grãos na profundidade de 344 cm, aumentando a fração areia. \_\_\_\_\_34

Figura 24 – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 400-466 cm. A fração predominante neste intervalo é silte-argilosa, com exceção na profundidade 407 cm onde a granulometria é síltica. \_\_\_\_\_35

Figura 25 – Imagens de MEV correspondem aos 138 cm mais recente, destacando a predominância de espículas silicosas e amorfas, além da matéria orgânica (imagens A, B correspondem a profundidade de 25 cm; C e D correspondem a profundidade de 80 cm; E e F correspondem a profundidade de 138 cm). \_\_\_\_\_39

Figura 26 – Constituição mineralógica dos primeiros 100 cm, a partir do topo, da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz - quartzo. \_\_\_\_\_40

- Figura 27 – Imagem MEV da amostra VM 23-27, destacando fragmentos de vegetal e espículas silicosas, associadas aos espectros de SED de micro-análises semiquantitativas com respectivos pontos analisados de 1 a 4. Tr – traços. \_\_\_\_\_ 41
- Figura 28 – Imagens MEV da amostra VM 78-82 (A e B), destacando um material predominantemente amorfo com fragmentos de vegetal, associadas aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas: 1A a 3A, respectivos à imagem A, e 1B, respectivo à imagem B. Tr - traços. \_\_\_\_\_ 42
- Figura 29 – Constituição mineralógica do intervalo de 100-200 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Gt - goethita; Kln – caulinita; Ant – anatásio; Sd – siderita. \_\_\_\_\_ 43
- Figura 30 – Imagem MEV da amostra VM 134-138, destacando um material rico predominantemente constituído de matéria orgânica, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas com respectivos pontos analisados: 1e 2. Tr – traços. \_\_\_\_\_ 44
- Figura 31 – Imagem MEV da amostra VM 172-176 (A), destacando um material predominantemente microcristalino, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1A a 3A. Tr – traços. \_\_\_\_\_ 45
- Figura 32 – Imagem MEV da amostra VM 172-176 (B), destacando um material microcristalino, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1B a 3B. Tr – traços. \_\_\_\_\_ 46
- Figura 33 – Constituição mineralógica do intervalo de 200-300 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Gt – goethita; Kln – caulinita; Ant – anatásio; Sd – siderita. \_\_\_\_\_ 47
- Figura 34 – Imagem MEV da amostra VM 219-223 (A), destacando uma superfície da caulinita, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1A a 4A. \_\_\_\_\_ 48
- Figura 35 – Imagem MEV da amostra VM 219-223 (B), destacando sucessões sedimentares, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas identificados de acordo com os pontos analisados de 1B a 3B. \_\_\_\_\_ 49
- Figura 36 – Imagem MEV da amostra VM 263-267, destacando um material predominantemente amorfo com fragmentos de vegetal, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes aos pontos analisados de 1 a 3. Tr – traços. \_\_\_\_\_ 50
- Figura 37 – Constituição mineralógica do intervalo de 300-400 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Kln – caulinita; Ant – anatásio. \_\_\_\_\_ 51
- Figura 38 – Imagem MEV da amostra VM 315-319, destacando um material predominantemente amorfo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado 1 e 2. \_\_\_\_\_ 52

Figura 39 – Imagem MEV da amostra VM 376-380, destacando um material predominantemente amorfo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado 1 e 2. Tr – traços. \_\_\_\_\_ 53

Figura 40 – Constituição mineralógica do intervalo de 400-466 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Gt – goethita; Kln - caulinita; Ant – anatásio; Sd – siderita. \_\_\_\_\_ 54

Figura 41 – Imagem MEV da amostra VM 422-426 (A), destacando um material heterogêneo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1A a 5A. \_\_\_\_\_ 55

Figura 42 – Imagem MEV da amostra VM 422-426 (B), destacando um material heterogêneo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1B a 3B. \_\_\_\_\_ 56

Figura 43 – Imagem MEV da amostra VM 458-462, destacando um material microcristalino, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes aos pontos analisados de 1 a 3. \_\_\_\_\_ 57

Figura 44 – Distribuição da matéria orgânica ao longo do perfil do pântano Mauritia em comparação com os teores obtidos na análise de carbono total (AcmeLabs). TOT/C: carbono total. \_\_\_\_\_ 59

Figura 45 – Distribuição dos teores de CO<sub>2</sub> e C<sub>Org</sub> no perfil dos sedimentos do pântano Mauritia. \_\_\_\_\_ 60

Figura 46 – Espectros de IV destacando na região 4000-700 cm<sup>-1</sup> bandas características das frações húmicas correspondente a camada sedimentar mais recente (100 cm). SH – substâncias húmicas. \_\_\_\_\_ 62

Figura 47 – Espectros de IV destacando um intervalo de transição (150-165 cm) entre uma camada rica em matéria orgânica e outra de domínio dos minerais. Banda a 1417 cm<sup>-1</sup> sugere a presença de siderita. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln – goethita; Sd - siderita. \_\_\_\_\_ 63

Figura 48 – Espectros de IV destacando a presença das frações húmicas a partir da profundidade de 230 cm. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln – goethita; Sd - siderita. \_\_\_\_\_ 64

Figura 49 – Espectros de IV destacando o intervalo 300-400 cm com predominância das frações húmicas. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln - goethita. \_\_\_\_\_ 65

Figura 50 – Espectros de IV destacando um intervalo rico em frações húmicas (400-447 cm) seguida da base aparente do perfil onde estas estão degradadas (447-466 cm). Banda a 1417 cm<sup>-1</sup> pode ser correlacionada a presença de siderita. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln – goethita; Sd - siderita. \_\_\_\_\_ 66

- Figura 51 – Normalização dos elementos maiores e menores contra a média da crosta terrestre superior (Wedepohl 1995). \_\_\_\_\_ 69
- Figura 52 – Normalização dos elementos maiores e menores contra folhelhos (Turekian & Wedepohl 1961). \_\_\_\_\_ 70
- Figura 53 – Normalização dos elementos maiores e menores contra Formação Ferrífera (Soubiès *et al.* 1991). \_\_\_\_\_ 71
- Figura 54 – Distribuição dos óxidos dos elementos maiores, PF, C<sub>tot</sub> e S<sub>tot</sub> na sequência do pântano Mauritia (Químioestratigrafia). \_\_\_\_\_ 74
- Figura 55 – Diagramas químicos ternários para os sedimentos do pântano Mauritia, ressaltando as diferenças químicas entre as camadas, em termos de proporções dos elementos principais, em que a herança laterítica é muito forte e recebeu grande contribuição de material orgânico vegetal carbonoso, silicoso e ainda sulfídrico/sulfato. \_\_\_\_\_ 75
- Figura 56 – Diagramas químicos ternários para os sedimentos do pântano Mauritia, ressaltando as diferenças químicas entre as camadas, em termos de proporções dos elementos principais, em que a herança laterítica é muito forte e recebeu grande contribuição de material orgânico vegetal carbonoso, silicoso e ainda sulfuroso. \_\_\_\_\_ 76
- Figura 57 – Distribuição das concentrações dos elementos-traço na sequência sedimentar do pântano Mauritia, evidenciando a dependência das concentrações mais elevadas com as camadas marrons (CES e CEI), com menor teor de MO, englobando elementos classicamente residuais (Ga, Nb, Th, Zr e V) e aqueles lixiviáveis (Rb, Sr, Ba). \_\_\_\_\_ 82
- Figura 58 – Distribuição das concentrações dos elementos-traço na sequência sedimentar do pântano Mauritia, evidenciando a dependência das concentrações mais elevadas com as camadas marrons (CES e CEI), com menor teor de MO, englobando elementos classicamente residuais (Ga, Nb, Th, Zr e V) e aqueles lixiviáveis (Rb, Sr, Ba). \_\_\_\_\_ 83
- Figura 59 – Distribuição das concentrações dos elementos-traço terras raras na sequência sedimentar do pântano Mauritia, evidenciando a dependência das concentrações mais elevadas com as camadas marrons (CES e CEI), com menos MO. \_\_\_\_\_ 84
- Figura 60 – Distribuição dos elementos terras raras normalizados aos condritos, em que se resalta claramente as amostras das camadas marrons com valores muito mais altos e as de topo com valores mais baixos. Todas, no entanto, apresentam mesmo padrão de distribuição, exceto VM 438-442 e VM 263-267, de transição camada marrom-camada escura. \_\_\_\_\_ 85
- Figura 61 – Análise de agrupamento (dendrograma) entre os elementos químicos analisados em todas as amostras de sedimentos do pântano Mauritia, indicando as principais associações geoquímicas e suas afinidades mineralógicas e com a MO. \_\_\_\_\_ 87
- Figura 62 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás. \_\_\_\_\_ 90
- Figura 63 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás. \_\_\_\_\_ 91

Figura 64 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás. _____	92
Figura 65 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás. _____	93
Figura 66 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás. _____	94
Figura 67 – Perfil quimoestratigráfico com a distribuição dos valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ (em carbonatos e na matéria orgânica) e $\delta^{18}\text{O}$ para o pântano Mauritia. _____	97
Figura 68 – Imagem da lagoa da Caverna, na Serra Sul em Carajás, que pode representar como seria a lagoa pré-pântano no Pleistoceno Tardio, há 52.000 anos AP. _____	99
Figura 69 – Imagem da lagoa Cachoeira, na Serra Sul em Carajás, que pode representar como seria a lagoa pré-pântano Mauritia, entre 7450 e 3785 anos AP. _____	102

## TABELAS

Tabela 1 – Laboratório e métodos analíticos utilizados para análises químicas nos sedimentos do pântano Mauritia. _____	19
Tabela 2 – Os valores de radiocarbono para amostras analisadas. _____	25
Tabela 3 – Concentrações de $C_{\text{tot}}$ e $S_{\text{tot}}$ em amostras dos sedimentos do pântano Mauritia. _____	39
Tabela 4 – Conteúdo de $\text{CO}_2$ e $C_{\text{Org}}$ em amostras de sedimentos do pântano Mauritia. _____	60
Tabela 5 – Composição química dos sedimentos do pântano Mauritia comparada com as composições químicas do Lago Cachoeira, Média Crustal e Folhelhos. _____	68
Tabela 6 – Teores de carbono total ( $C_{\text{tot}}$ ) e enxofre total ( $S_{\text{tot}}$ ). _____	73
Tabela 7 – Concentrações dos elementos-traço nos sedimentos do pântano Mauritia. _____	79
Tabela 8 – Concentrações dos elementos-traço nos sedimentos do pântano Mauritia (Continuação). _____	80
Tabela 9 – Concentrações dos elementos-traço (terras raras) nos sedimentos do pântano Mauritia. _____	81
Tabela 10 – Valores dos isótopos $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para amostras analisadas. _____	96

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	iv
AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ESTUDOS ANTERIORES .....	1
1.2 OBJETIVO .....	3
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	3
1.4 ASPECTOS FISIOGRAFICOS .....	6
1.4.1 Relevo e vegetação .....	6
1.4.2 Clima .....	8
1.5 ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	9
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.2 SONDAGEM MANUAL .....	11
2.3 DESCRIÇÃO DO MATERIAL TESTEMUNHADO .....	13
2.4 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS .....	15
2.5 ANÁLISES MINERALÓGICAS .....	16
2.5.1 Difração de raios-X (DRX) .....	16
2.5.2 Espectrometria de Infravermelho (FTIR) .....	16
2.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura com Sistema de Análise Química por Energia Dispersiva (MEV/SED) .....	17
2.6 QUANTIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA .....	17
2.7 ANÁLISES QUÍMICAS .....	18
2.8 DATAÇÃO POR RADIOCARBONO ( $^{14}\text{C}$ ) E DETERMINAÇÃO DE $\delta^{13}\text{C}$ .....	19
2.9 ANÁLISE ISOTÓPICA: $\delta^{13}\text{C}$ E $\delta^{18}\text{O}$ EM CARBONATO (SIDERITA) .....	21
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
3.1 SEQUÊNCIA DE SEDIMENTOS .....	21
3.2 IDADE RADIOCARBONO DOS SEDIMENTOS .....	25
3.3 CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS .....	27
3.4 MINERALOGIA .....	36
3.5 MATÉRIA ORGÂNICA .....	58
3.5.1 Caracterização da MO carbonosa por FTIR .....	60
3.6 GEOQUÍMICA .....	67
3.6.1 Composição química e quimioestratigrafia .....	67
3.6.2 Elementos-traços e quimioestratigrafia .....	77
3.6.3 Associações geoquímicas .....	86
3.6.4 Quimioestratigrafia Isotópica .....	95
<b>4 EVOLUÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO NA ÁREA DO PÂNTANO MAURITIA .....</b>	<b>988</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>103</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	104
ANEXOS .....	111

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ESTUDOS ANTERIORES

O crescente interesse sobre as ocorrências paleoclimáticas em regiões tropicais e equatoriais, resultou nas últimas décadas, em publicações na busca de demonstrar como a sequência e a natureza dos processos superficiais reagiram a mudanças do clima do passado, baseando-se, em sua maioria, em argumentos sedimentológicos (Suguio *et al.* 1993, Turcq *et al.* 1993), geomorfológicos (Servant *et al.* 1981), isotópicos (Victoria *et al.* 1995, Desjardins *et al.* 1996, Pessenda *et al.* 1996a, Pessenda *et al.* 1996b, Pessenda *et al.* 1996c, Pessenda *et al.* 1997) e palinológicos (Absy & Van Der Hammen 1976, Absy 1985, Ledru 1992, Ledru 1993), nos quais indicam a ocorrência de variações paleoclimáticas durante o Quaternário na bacia Amazônica, em outras áreas do Brasil e da América do Sul.

Devido à extensa rede hidrográfica da bacia Amazônica, representada pelos rios Solimões-Amazonas, desenvolvem-se extensas planícies de inundação com inúmeros lagos, alguns muitos extensos, além de formação de várzeas infinitas. Além dos lagos desenvolvidos nas planícies aluviais, destacam-se aqueles sobre platôs estabelecidos sobre crostas lateríticas ferruginosas, exemplificados pelas regiões de Maicuru, Maracaná, Seis Lagos e Carajás. São lagos pequenos, desconectado em geral de drenagem característica, onde concentram-se depósitos sedimentares com importantes registros de mudanças paleoambientais na região Amazônica.

Os lagos são ambientes coletores de registros característicos da região ao qual pertencem, em que seus sedimentos de fundo se apresentam como importantes materiais para pesquisa paleoambientais e geológicas locais. Vários estudos já foram realizados nos lagos da região Amazônica, como: em Caxiuanã na Amazônia Oriental (Costa *et al.* 1997, Behling & Costa 2000); Seis Lagos na Amazônia Ocidental (Colinvaux *et al.* 1996, Colinvaux *et al.* 2000, Colinvaux & Oliveira 2001); na Laguna Piusbi na Colômbia (Behling *et al.* 1998); lago Crispim no Pará (Behling & Costa 2001); Lagos Curuçá (Behling 2001); lago Calado (Behling *et al.* 2001); lagos Grande, Poção, Santa Ninha e Salé (de águas brancas) e Curumucuri e Açai (de águas pretas) no município de Óbidos, Pará (Amorim *et al.* 2005); lagos Coari e Acará no Amazonas (Horbe *et al.* 2005), lago Acarabixi no Amazonas (Costa *et al.* 2005a); lagos Comprido, Camaleão e Central no Amazonas (Seyler *et al.* 2005); lago Amapá, no Acre (Carvalho 2006).

Na Amazônia destacam-se ainda os inúmeros lagos ou bacias lacustres, formados sobre as crostas lateríticas, localizados tanto na Serra Norte como na Sul em Carajás. Estes ocupam depressões restritas parcialmente interligadas e fechadas, portanto coletores de materiais detríticos e orgânicos, a exemplo dos lagos de Seis Lagos e em Carajás (Absy *et al.* 1991), Soubiés *et al.* (1991), Van der Hammen & Absy (1994), Corrêa (1996); Hooghiemstra & Van der Hammen (1998); Suguio (1999); Colinvaux *et al.* (2000), Mayle *et al.* (2000), Elias *et al.* (2001), Sifeddine *et al.* (2001), Bush *et al.* (2002), Turcq *et al.* (2002), Sifeddine *et al.* (2004) e Costa *et al.* (2005b), visando identificar mudanças paleoclimáticas nos últimos 50,000 anos A.P. A maioria destes estudos, no entanto, se preocupou com a identificação da associação polínica e datação, sem realizar estudos geoquímicos e mineralógicos mais aprofundados, excetos aqueles de Costa *et al.* 2005b, procurando identificar uma interrelação entre as rochas circunvizinhas e a natureza dos sedimentos de fundos.

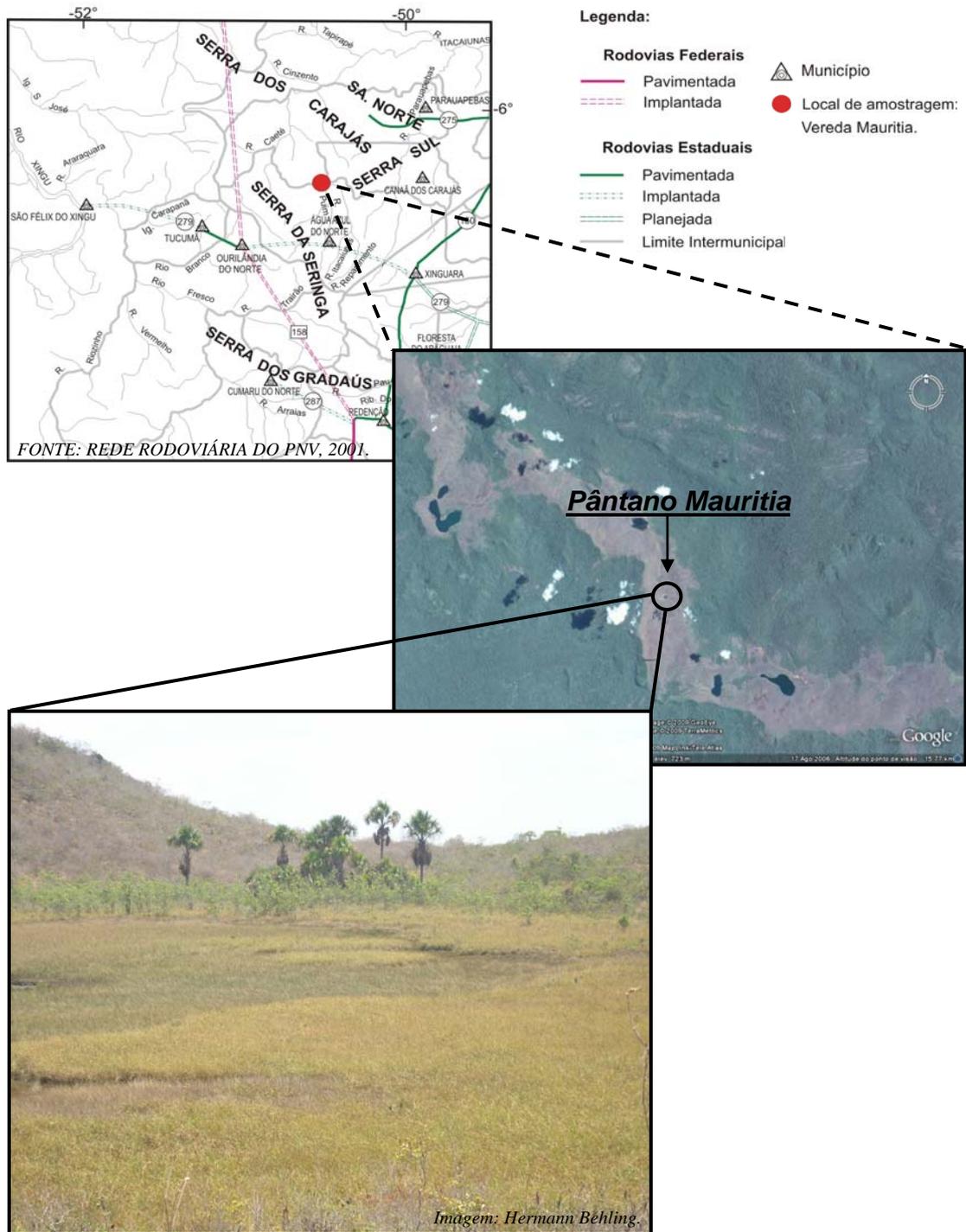
## 1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo fundamental tentar reconstituir a história dos sedimentos do pântano Mauritia na Serra Sul em Carajás, a partir de estudos geológicos, mineralógicos, geoquímicos, isotópicos e de radiocarbono e a sua inserção dentro do quadro evolutivo da região Amazônica a partir do Pleistoceno Tardio.

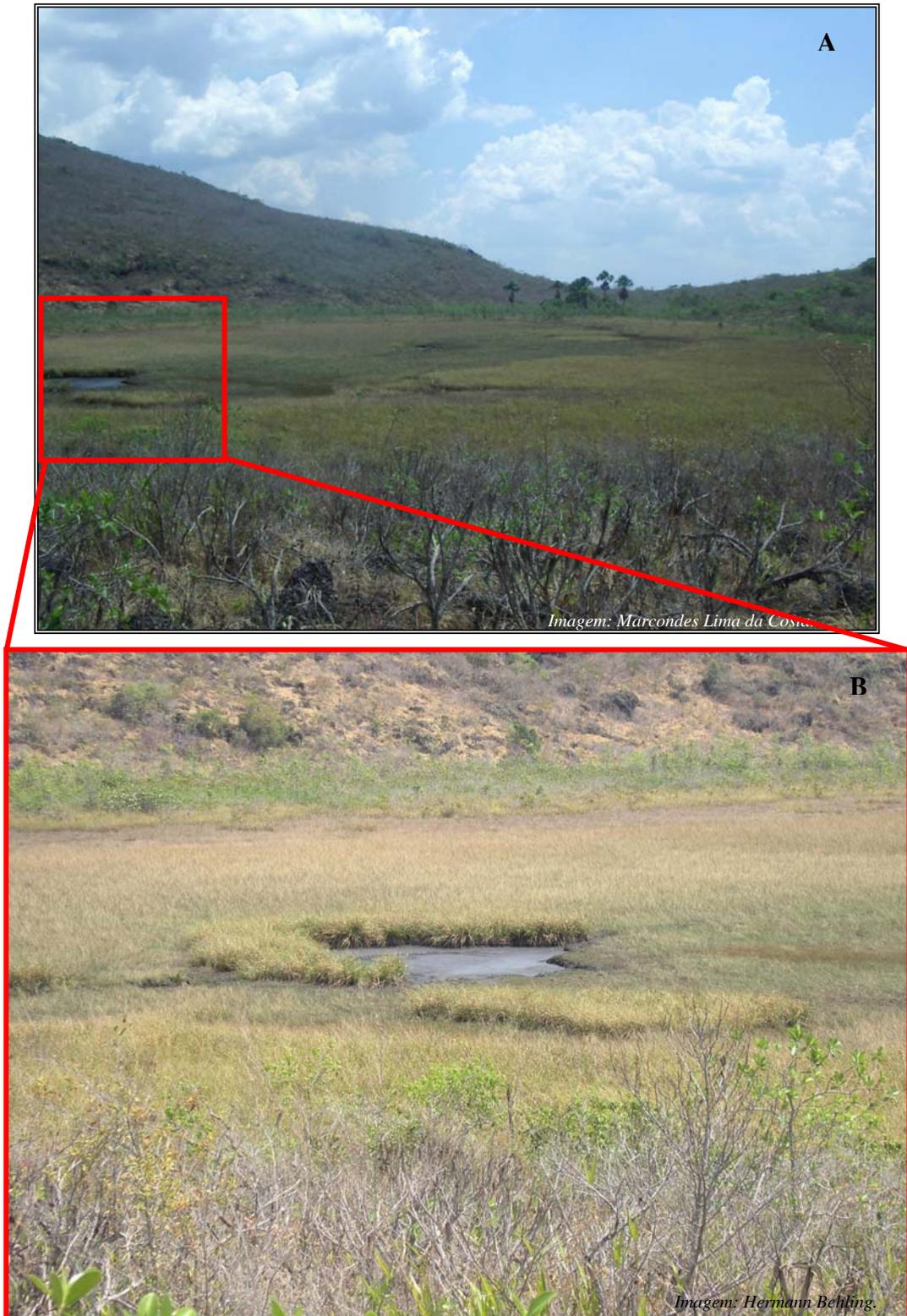
## 1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O pântano Mauritia, área do presente estudo, está localizada na Serra Sul da região de Carajás, no sul do Estado do Pará, a uma altitude entre 700 e quase 900 m.

Devido ao aspecto característico da região, o local de coleta do testemunho (06°22'33.4"S e 50°23'09.6"W) foi denominado pântano Mauritia (Figuras 1 e 2).



**Figura 1** - Mapa de localização do pântano Mauritia e imagem de satélite mostrando o relevo de quase-platô desprovido de floresta e coberto por savana arbustiva e graminosa. Na foto abaixo se observam às árvores de buritis e o canal raso, por onde flui a água durante o período chuvoso. E neste local foi realizada a amostragem.



**Figura 2** – Na foto (A) destaca-se uma visão geral da depressão subcircular pântano Mauritia e de forma detalhada, na foto (B), visualiza-se um ambiente tipicamente pantanoso.

## 1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

### 1.4.1 Relevo e vegetação

A região de Carajás se caracteriza por uma paisagem constituída por extensos platôs intercalados por vales abertos e em forma de U, localmente fechados em forma de V. Os platôs tem superfície sub-plana a ondulada, mesmo fortemente onduladas, com inúmeras depressões, e sua altitude varia entre 500 e 900 m, normalmente na faixa de 600 m. Os platôs se alongam na direção leste-oeste a noroeste-sudeste, com várias unidades de quilômetro de extensão. O topo da superfície de platôs foi esculpida ou mesmo está protegida por crostas ferruginosas, densas, magnéticas, por vezes verdadeiras formações ferríferas, localmente aluminosas e manganésíferas. Por sua vez os vales foram esculpidos sobre saprolitos transformados em solos e/ou coberto por depósitos coluvionares.

Na área do pântano *Mauritia* instalada num vale aberto no topo do principal platô da Serra Sul, próximo a vários lagos e sedimentos lacustres o relevo está representado por uma superfície alta, com topo ondulado a semi-plano, cortado por pequenos vales, por vezes estreitos e desnivelados, equivalente a um planalto, como uma superfície de aplainamento Sul-Americana. A superfície alta ou o planalto é bordejado por encostas íngremes, que convergem para uma paisagem rebaixada, ondulada, situada entre 200 e 350 m de altitude. A superfície do planalto ondulado é coberta por campos arbustivos, os vales podem apresentar formações arbóreas, como palmeiras, como o buriti, e as encostas são tomadas por floresta tropical densa, a mesma da planície rebaixada. O relevo foi esculpido sobre crostas ferruginosas e formações ferríferas bandadas lateritizadas, densas, magnéticas, por vezes verdadeiras formações ferríferas, em nível de rico minério de ferro. Neste relevo ocorrem muitas depressões subcirculares, em geral ocupadas por lagos, além de vales de pequeno a médio porte, com fundo desde em U a V, por vezes parcialmente preenchidos e aplainados por sedimentos lacustres e/ou coluvionares, pântanos, ocupados por vegetação, que varia de gramíneas (savanas) a formações arbustivas (Figuras 3 e 4). Localmente apresentam cursos d'água ocupados por palmeiras dominadas por buritis (*Mauritia vinifera* ou *Mauritia flexuosa*), formando os buritizais caracterizando um ambiente denominado vereda (Ferreira 2005) ou ainda campos úmidos dominados por junco. Estes aspectos conferem um grande contraste à paisagem desnuda e muito quente, e servem de palco para vida animal, principalmente pássaros, alguns peixes e poucos jacarés.



**Figura 3** – Visualização da vegetação típica da Serra dos Carajás.



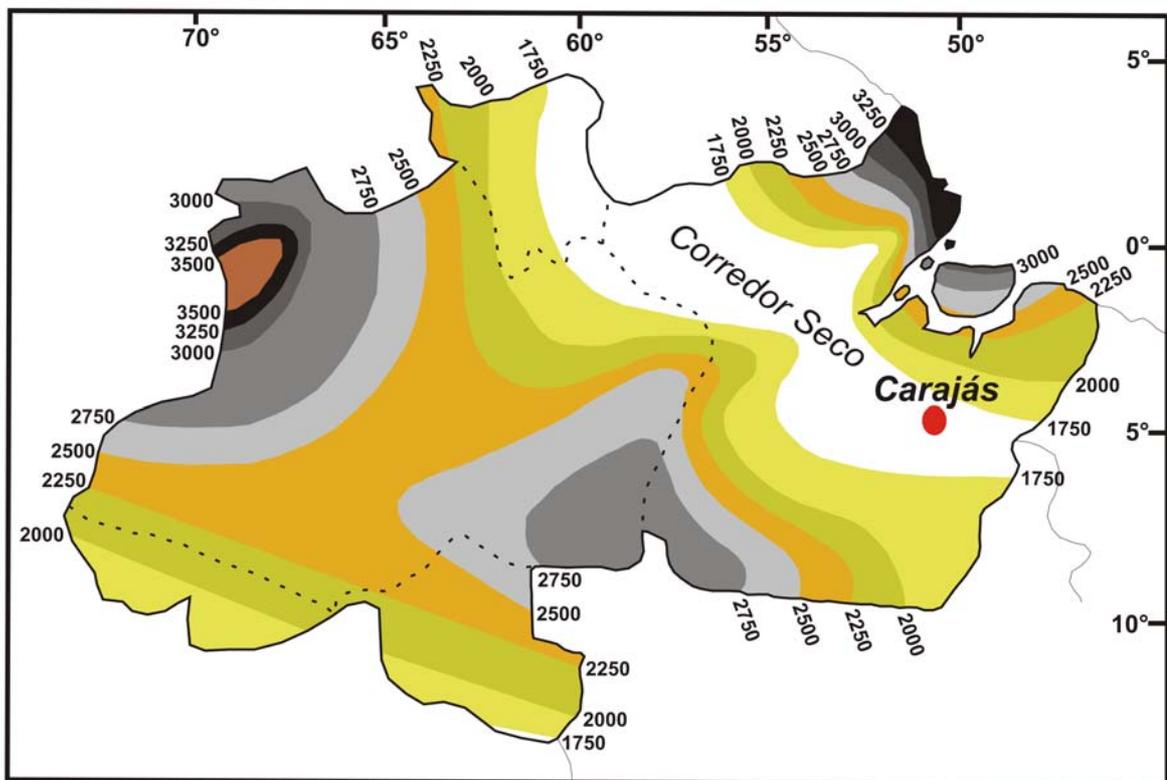
**Figura 4** – Visualização destacando uma das vegetações típicas da Serra dos Carajás, o junco.

### 1.4.2 Clima

O clima da região de Carajás é do tipo equatorial super-úmido, Am na classificação de Koeppen, no limite de transição para o tipo Aw. A temperatura média é de 26°C, com umidade relativa de 98% no período chuvoso e de 52% no período seco, com média anual de 75% (Teixeira & Beisiegel 2006). Os meses de novembro a maio correspondem ao período de maior precipitação e umidade, enquanto o de junho a outubro ao de baixa precipitação, baixa umidade e muito seco.

A mudança de estação climática da região de Carajás tem como elemento regulador principal a precipitação, pois as médias de precipitação total anual ao longo dos anos na região de Carajás são muito variáveis.

A região de Carajás está situada no “corredor seco” da Amazônia brasileira (Soubiès 1980, Soubiès *et al.* 1991, Bush 1994, Van der Hammen & Absy 1994), onde as precipitações são menos abundantes (1500 a 2000 mm/ano) (Soubiès *et al.* 1991) se comparadas às regiões adjacentes onde as precipitações variam de 2000 a 3000 mm/ano (Figura 5).



**Figura 5** – Precipitação anual (mm/ano) da Amazônia Brasileira com destaque para o “corredor seco” (faixa em branco), onde as precipitações não ultrapassam 1750 (Adaptado de Siffedine 2001 e Filho *et al.* 2003).

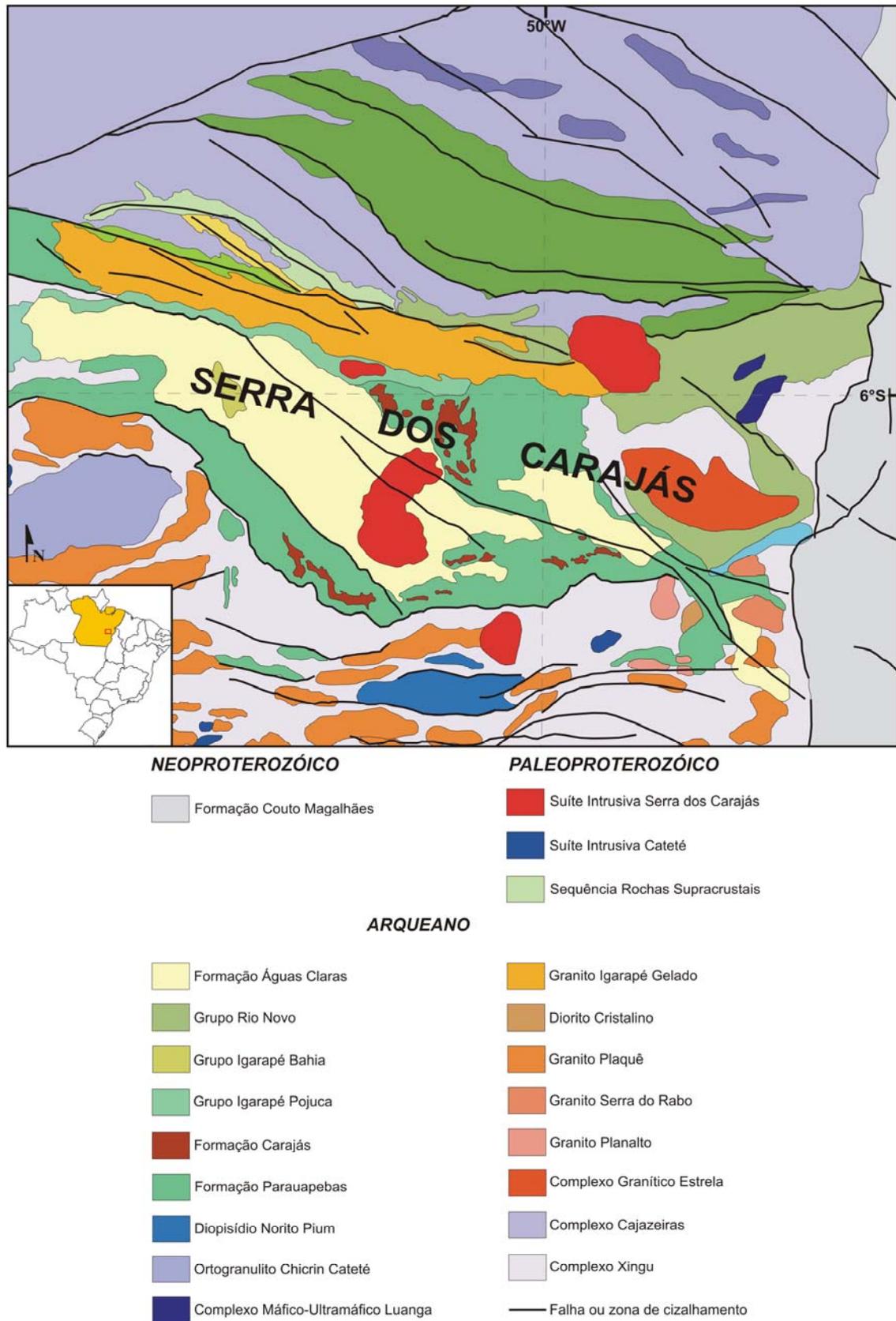
## 1.5 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A região dos Carajás está situada na porção sudeste do Cráton Amazônico, mais precisamente na porção oriental da Província Tapajós (Almeida *et al.* 1981) ou da Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 1999). A geologia é complexa, em que grande parte das rochas tem idades arqueanas a paleoproterozóicas (Machado *et al.* 1991, Pimentel & Machado 1994, Macambira & Lafon 1995), que se apresentam em dois segmentos crustais, um ao norte e outro ao sul (Araújo *et al.* 1988). O segmento sul é representado pelos terrenos granito-*greenstone* de Rio Maria (Huhn *et al.* 1988) e é mais antigo que o segmento norte (Dall'Agnol *et al.* 1997), o qual corresponde Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988). Recentes dados geocronológicos em rochas nas cercanias de Canaã de Carajás sugerem que aqueles limites possam estar bem mais próximos da borda sul da bacia de Carajás do que antes suposto (Sardinha *et al.* 2004). Ademais, Barros & Barbey (2000) contestam que o bloco Itacaiúnas represente um cinturão de cisalhamento e o interpretam como um possível cinturão plutonometamórfico, denominando-o de domínio Carajás ou na designação de outros, bloco Carajás (Souza *et al.* 1996) (Figura 6).

Na região de Rio Maria, os terrenos granito-*greenstones* abrangem uma grande área, constituída pelo Supergrupo Andorinhas e o Tonalito Arco Verde (Pimentel & Machado 1994, Macambira & Lancelot 1996), e granitóides diversos, representados pelos Granodiorito Rio Maria, Trondhjemitó Mogno e pelos granitos Xinguara e Mata Surrão (Hirata *et al.* 1982, Araújo *et al.* 1988, DOCEGEO 1988 a b, Pimentel & Machado 1994, Macambira & Lancelot 1996, Dall'Agnol *et al.* 1997, Leite 2001).

O embasamento do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas é constituído de gnaisses (Complexo Xingu) e granulitos (Complexo Pium) (Machado *et al.* 1991, Avelar *et al.* 1999, Pidgeon *et al.* 2000). Na área são abundantes os afloramentos de rochas metavulcano-sedimentares que se sobrepõem às rochas do embasamento, constituem os grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará, Igarapé Bahia, entre outros, e são englobados no Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO 1988).

Na região de Carajás, extensas seqüências de plataforma, conhecida como Formação Águas Claras (Araújo *et al.* 1988), são compostas principalmente por rochas arqueanas sedimentares de ambientes litorâneos a fluviais (Nogueira *et al.* 1995), recobrem o Supergrupo Itacaiúnas.



**Figura 6** - Mapa geológico da região dos Carajás no Estado do Pará. Adaptado de Vasquez *et al.* (2008).

Sobre estas rochas arqueanas a paleoproteróicas de terrenos granito-greenstones e formações ferríferas e manganésíferas desenvolveram espessos pacotes de formações lateríticas cenozóicas, que em suas depressões, foram posteriormente ocupadas por ambientes lacustres e seus sedimentos, a exemplo do que hoje se conhece como pântano Mauritia.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa do trabalho foram realizados levantamentos bibliográficos referentes, principalmente, a artigos e informações de livros sobre aspectos geológicos, geoquímicos e fisiográficos da região em estudo que deram subsídios para construção deste trabalho, além da literatura pertinente a geologia, mineralogia, geoquímica de ambientes lacustres distribuídos pelo mundo, principalmente aqueles relacionados com substrato laterítico sob clima tropical e subtropical.

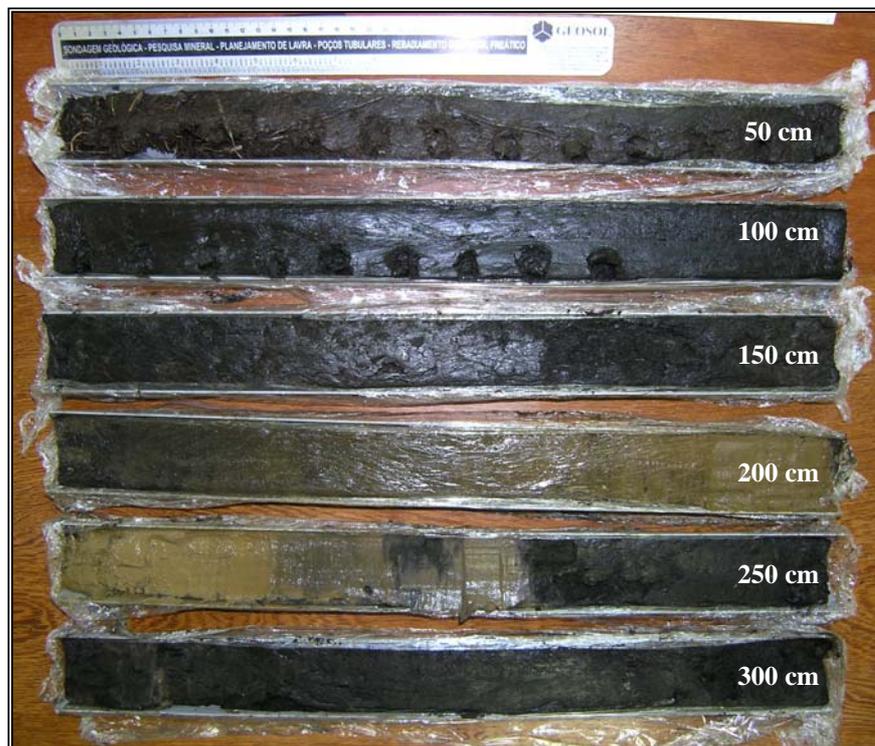
### 2.2 SONDAGEM MANUAL

Como não há exposição natural da sequência de sedimentos na bacia do pântano Mauritia, foi necessário realizar uma sondagem. Esta foi realizada em agosto de 2005 pelos professores Dr. Marcondes Lima da Costa, da Universidade Federal do Pará, e Dr. Hermann Behling, então da Universidade de Bremen e hoje na Universidade de Goettingen, na Alemanha, dentro do projeto de estudos de ambientes lacustres quaternários na região Amazônica nesta época concentrando-se em Carajás. A sondagem foi feita com auxílio de uma sonda manual do tipo *Livingstone* com hastes e tubos de alumínio com 5 cm de diâmetro (Figura 7). Foram coletados 4,66 m de testemunho de sedimento, em local de aspecto pantanoso. Os testemunhos de sondagem foram conservados em tubos de PVC (*polivinil-clorine*) em seções com 50 cm de comprimento; e em seguida foram revestidos com filme de PVC transparente e folha de alumínio com o objetivo de inibir a perda de umidade e a oxidação do material (Figura 8).



*Imagem: Marcondes Lima da Costa.*

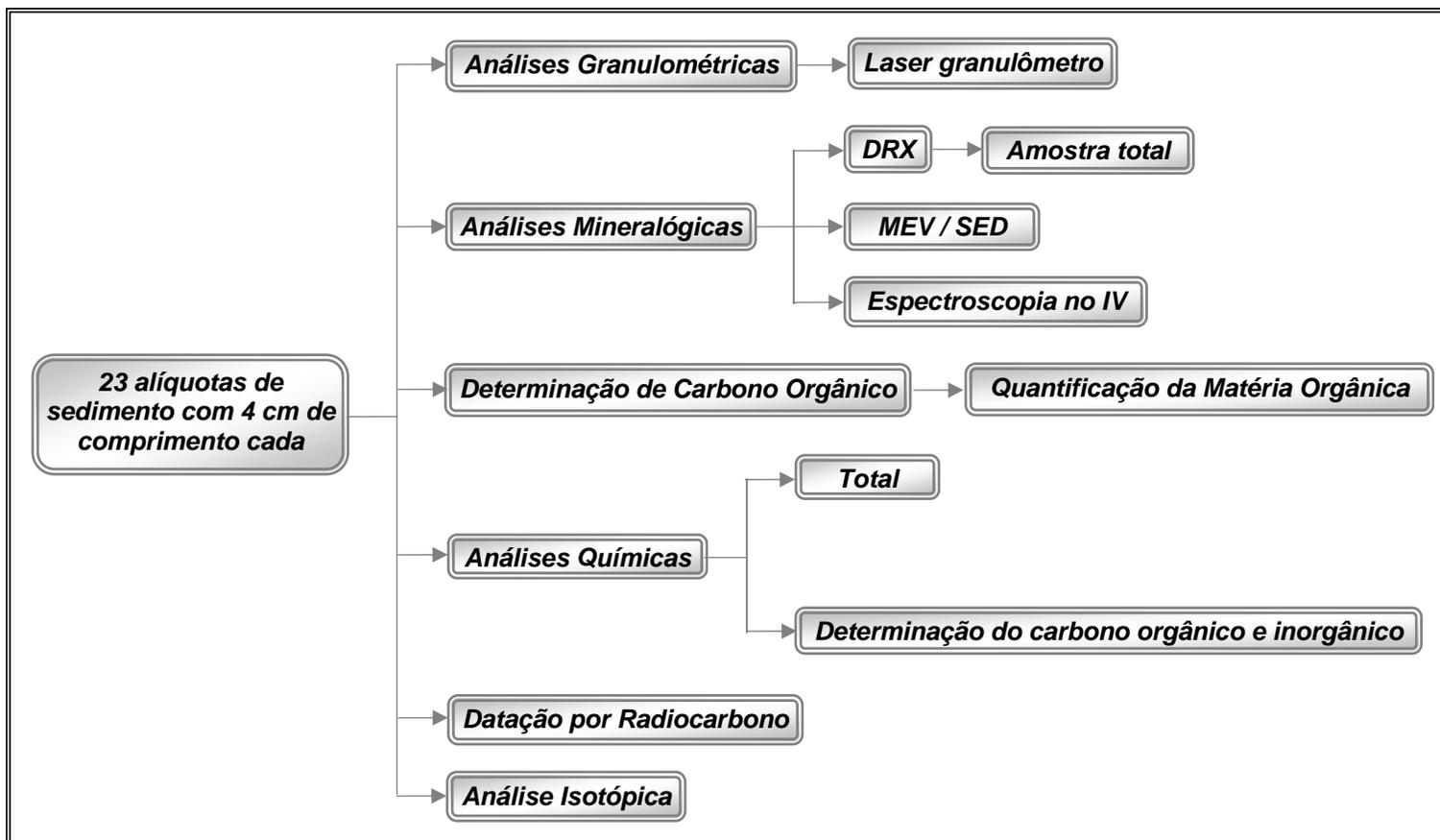
**Figura 7** - Coleta de sedimentos no pântano Mauritia com auxílio de sonda manual tipo *Livingstone*.



**Figura 8** – Imagem mostrando o material testemunhado no intervalo de 1 à 3,00 m, já transferidos para o tubo de PVC (*polivinil-clorine*).

### 2.3 DESCRIÇÃO DO MATERIAL TESTEMUNHADO

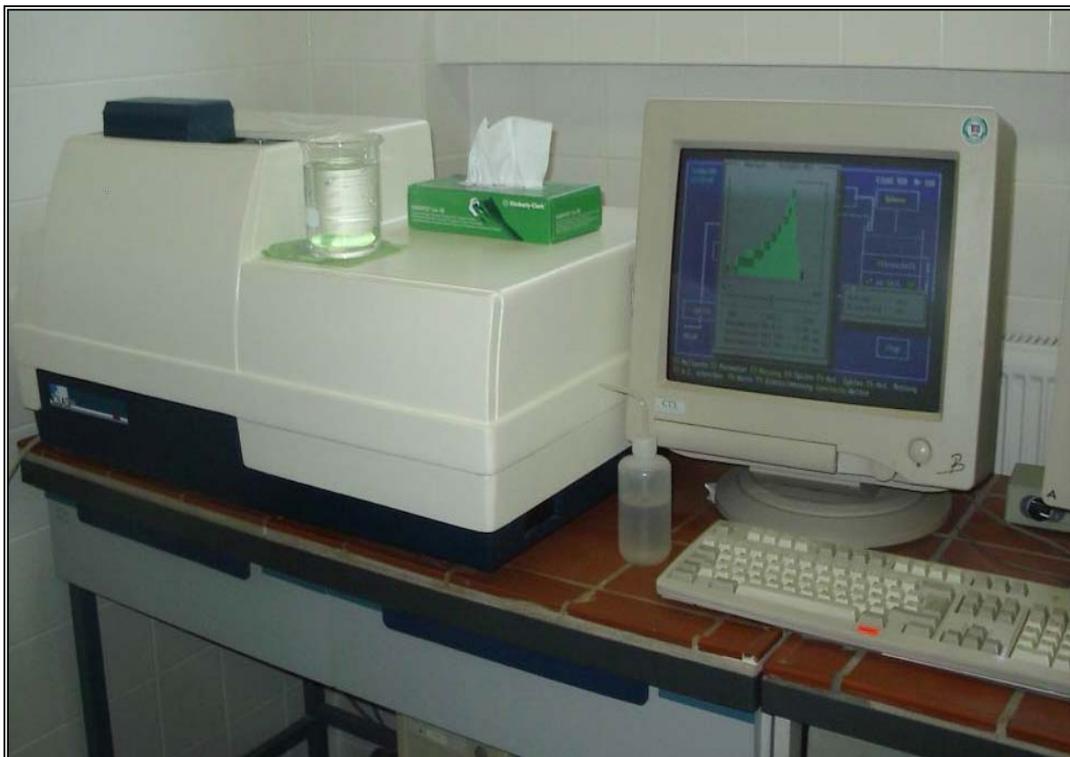
As seções de 50 cm de comprimento foram fotografadas, etiquetadas e descritas conforme as mudanças de coloração, presença de bandamento, ocorrência de material orgânico e variação na granulometria. Em seguida estabeleceram-se os intervalos para amostragem, procurando cobrir todas as variações litológicas possíveis e sua relação com a profundidade. Foram extraídas 23 amostras para realização de análises granulométricas, mineralógicas (DRX, espectroscopia no infravermelho), micromorfológica, química total, carbono orgânico e inorgânico, isotópica e datação por radiocarbono (Figura 9).



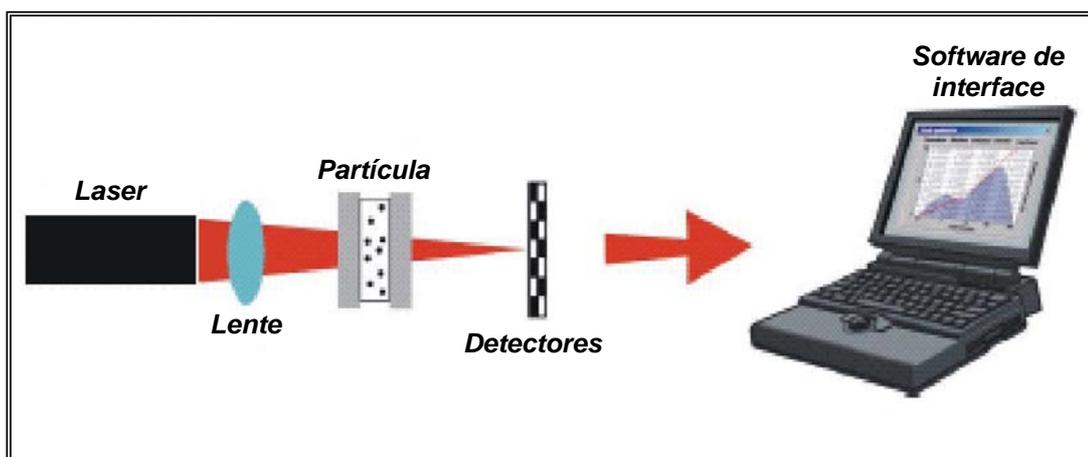
**Figura 9** – Fluxograma das diferentes etapas desenvolvidas com as amostras do perfil do pântano Mauritia.

## 2.4 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

21 amostras foram submetidas à quantificação de faixas de tamanho de grãos com auxílio de um analisador de tamanho de partícula a laser, o sedígrafo Quantachrom-Cilas920, com capacidade para analisar partículas com granulometria na faixa de 0,3 a 400  $\mu\text{m}$  (Figura 10). A imagem de difração provocada pelas partículas analisadas é projetada numa matriz de fotodiodos por um diodo laser de alta estabilidade e resistência. Por meio do *software The Particle Expert* obtiveram-se os dados de distribuição de tamanho de grãos, em porcentagem, e gráficos de distribuição de percentual de cada intervalo granulométrico (Figura 11), com visualização de resultados em tempo real e controle de qualidade dos mesmos. Assim puderam ser construídos os histogramas e reproduzidas as curvas acumuladas. As análises foram realizadas no Institut fuer Geowissenschaften da Universidade de Halle, na Alemanha, aos cuidados do prof. Dr. Herbert Joseph Poellmann.



**Figura 10** – Laser granulômetro sedígrafo Quantachrom-Cilas 920 do Institut fuer Geowissenschaften da Uni Halle. Na tela observam-se os diferentes gráficos com curvas de distribuição no momento da análise (Imagem: Marcondes Lima da Costa).



**Figura 11** – Representação da análise granulométrica com sedígrafo Cilas 920 e *software* (*The Particle Expert*). Modificado do site [www.cilasus.com](http://www.cilasus.com) (Carvalho 2006).

## 2.5 ANÁLISES MINERALÓGICAS

### 2.5.1 Difração de raios-X (DRX)

A identificação das fases mineralógicas em amostra total foi realizada por difração de raios x (DRX) a partir da amostra pulverizada (método do pó). O aparelho utilizado foi um difratômetro de raios-x de marca PANalytical, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), com goniômetro PW 3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Co ( $K\alpha_1$  1,78901 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60Kv. O espectro ou difratograma foi obtido por meio de uma varredura do detector (tipo RTMS, X' Celerator) com intervalo de exposição de 4 a  $75^\circ 2\theta$ . A aquisição de dados dos registros foi feita com o software *X'Pert Data Collector*, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software *X'Pert HighScore* versão 2.1b, também da PANalytical. Todas estas análises foram executadas no Laboratório de Difração de Raios X do Instituto de Geociências.

### 2.5.2 Espectrometria de Infravermelho (FTIR)

Para complementar e aperfeiçoar as identificações mineralógicas por DRX empregou-se também a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Para tal empregou-se 0,0015g de amostra pulverizada e como dispersante 0,2000g de brometo

de potássio (KBr). Após a homogeneização da amostra com KBr, confeccionou-se pastilha com uma prensa sob pressão de 1,8 Kbar. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro Perkin-Elmer, modelo 1760 X FT-IR, acoplado a um microcomputador, com registros da faixa espectral de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com medições a cada 4  $\text{cm}^{-1}$ . O equipamento pertence ao Laboratório de Infravermelho no Instituto de Geociências da UFPA.

### **2.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura com Sistema de Análise Química por Energia Dispersiva (MEV/SED)**

As análises com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Sistema de Energia Dispersiva (SED) foram realizadas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, utilizando-se um microscópio eletrônico LEO modelo 1450VP. As amostras empregadas foram previamente secas em temperatura ambiente e montadas em suporte de alumínio com 10 mm de diâmetro. Em seguida, a fim de se tornarem condutivas, foram metalizadas com Au por 2min30s, o que deposita sobre a amostra uma película com espessura média de 15 nm. As imagens foram geradas por detecção de elétrons secundários, utilizando-se aceleração de voltagem de 17,5 kV e distância de trabalho de 15 mm. As análises químicas pontuais (micro-análises), de natureza semi-quantitativa, foram realizadas com apoio de detector de EDS (Energy Dispersive System) marca Gresham, equipado com janela de Be e analisador multicanal Q500 da IXRF. Os resultados obtidos ocorreram após um tempo de aquisição de 30 segundos. Desta forma obteve-se imagens e análises químicas semi-quantitativas de fragmentos de amostras dos sedimentos coletados.

## **2.6 QUANTIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA**

A matéria orgânica foi quantificada de forma indireta ao se determinar o carbono orgânico através do Método de Walkley-Black (Walkley & Black 1947) modificado por Jackson (1958). Este método utiliza aquecimento e oxidação com solução de dicromato em meio ácido (ácido sulfúrico) de uma alíquota da amostra e posterior titulação com sulfato ferroso amoniacal, do excesso do dicromato não utilizado na oxidação da matéria orgânica. Devido ao teor elevado de matéria orgânica de algumas amostras, reduziu-se a massa pela

metade, evitando assim possíveis erros na análise e diminuindo o consumo da solução titulante.

Para a conversão em matéria orgânica foi utilizado o fator de conversão 1,72 e quantificada de acordo com a seguinte equação:

$$\% M_{org} = 10 (1 - T/S) \times F \quad (1)$$

Onde,

**S** = Padronização do Branco (volume de solução ferrosa amoniacal).

**T** = Titulação da amostra (Volume de solução ferrosa amoniacal).

**F** = Fator.

O fator F foi determinado a partir da seguinte equação:

$$F = (1N) \times (12/4000) \times 1,72 \times (100/\text{peso da amostra}) \quad (2)$$

A determinação de matéria orgânica em amostras do pântano Mauritia foi realizada no Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Geociências (UFPA).

## 2.7 ANÁLISES QUÍMICAS

Para a determinação da composição química total incluindo os elementos-traço dos sedimentos do pântano Mauritia selecionou-se dezessete amostras. Elas foram analisadas no AcmeLabs em Vancouver. Dentre estas amostras foram selecionadas quatro para quantificação de C orgânico ( $C_{Org}$ ) e C inorgânico ( $CO_2$ ). Os métodos empregados estão indicados na Tabela 1. Neste pacote analítico da Acme foram ainda determinados perda ao fogo (LOI), carbono total e enxofre total (Tabela 1).

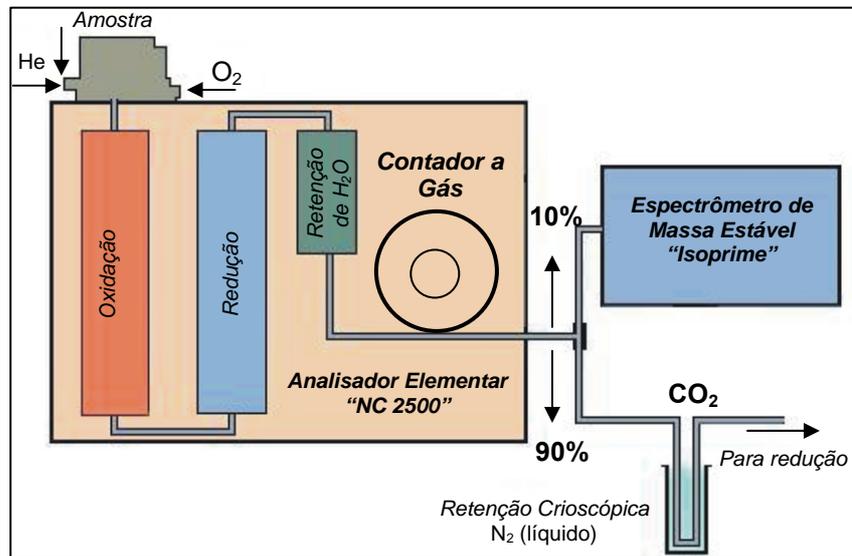
**Tabela 1** – Laboratório e métodos analíticos utilizados para análises químicas nos sedimentos do pântano Mauritia.

Laboratório	Método	Análise Instrumental	Elementos analisados	Unidade
AcmeLabs	Abertura total em fusão com metaborato /tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico (0,1g da mostra).	ICP	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, CaO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , MnO, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	%
			Sc.	
	Abertura total em fusão com metaborato /tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico (0,1g da mostra).	ICP-MS	Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.	ppm
	Digestão em água régia (0,5g da amostra).	ICP-MS	Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, Hg, Tl, Se.	
	Diferença de peso por combustão a 1000°C.	-	PF (LOI).	
	-		C <sub>tot</sub> , S <sub>tot</sub> .	
	C Total menos C grafite e carbonato.	LECO	C orgânico.	%
Obtido diretamente do CO <sub>2</sub> .	C inorgânico.			

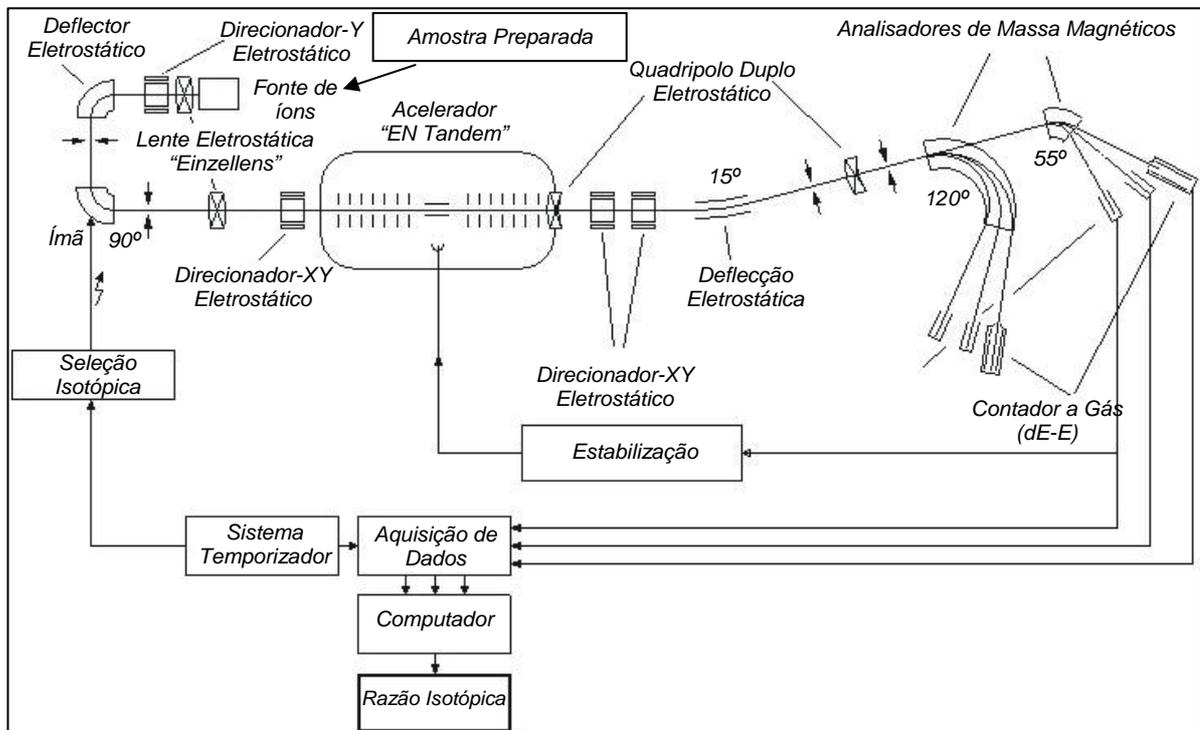
## 2.8 DATAÇÃO POR RADIOCARBONO (<sup>14</sup>C) E DETERMINAÇÃO DE δ<sup>13</sup>C

A idade por radiocarbono <sup>14</sup>C foi determinada por espectrometria de massa por aceleração (AMS-facility) no AMS-Labor Erlangen do Physikalisches Institut Abt.IV da Universidade de Erlangen na Alemanha. Esta técnica é utilizada para amostras com concentração inferior a 0,1 g de carbono, sendo uma das principais ferramentas para a determinação cronológica de episódios originados há no máximo 40.000 a 50.000 anos atrás, e que encontra inúmeras aplicações na arqueologia, geologia, paleobotânica e paleoclimatologia. Simultaneamente foram determinados os valores de δ<sup>13</sup>C na matéria orgânica. Os procedimentos analíticos estão disponíveis no site [www.14c.uni-erlangen.de](http://www.14c.uni-erlangen.de) e ilustrados nas figuras 12 e 13.

Foram selecionadas cinco amostras representando as profundidades 93-97 cm, 134-138 cm, 238-242 cm, 342-346 cm e 438-442 cm.



**Figura 12** - Diagrama de combustão de amostra em um analisador elemental (Carvalho 2006).



**Figura 13** - Diagrama das etapas de funcionamento do espectrômetro de massa por aceleração (AMS-facility) da Universidade de Erlangen (Carvalho 2006).

## 2.9 ANÁLISE ISOTÓPICA: $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ EM CARBONATO (SIDERITA)

As análises foram realizadas no laboratório de Isótopos Estáveis da Universidade de Nova Zelândia (GNS). Para a determinação dos valores de isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ , foram selecionadas amostras com maiores teores em siderita. Estas foram submetidas à temperatura de 80°C e as razões isotópicas determinadas por espectrometria de massa GEO 20-20 (IRMS) via entrada dupla (DI), segundo o protocolo “Europa Carbonate Automated Preparation System”. As razões isotópicas são expressas em valores do delta em relação às escalas internacionais. Para calcular a relação de uma amostra desconhecida é necessário compará-lo com uma referência conhecida e aplicar a seguinte equação:

$$d = ((\text{delta-primas amostra} / \text{referência delta-primas}) - 1) \times 1000 \quad (1)$$

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 SEQUÊNCIA DE SEDIMENTOS

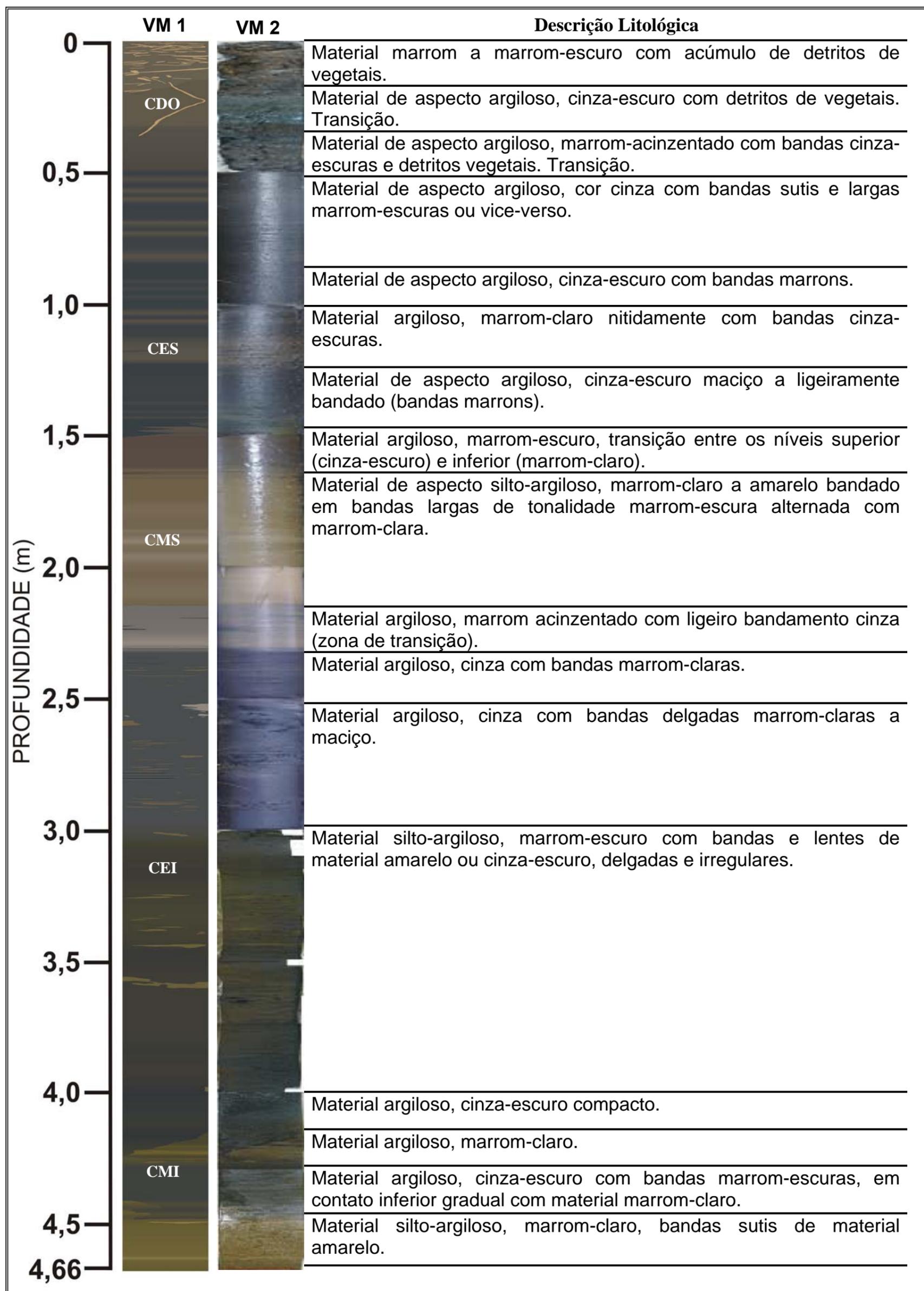
A seqüência sedimentar observada ao longo dos 4,66 m de sondagem no pântano Mauritia é dominada por material de aspecto argiloso a silto-argiloso, que se apresenta na forma de alternância de camadas cinza a cinza-escura e marrom-acinzentado, marrom-claro e marrom-escuro, que internamente são por sua vez microbandadas, em que as camadas de domínio marrom são listradas por tons cinza-escuros e as camadas cinza-escuros por microbandas marrons. Portanto a alternância se dá tanto em escala milimétrica, decimétrica e métrica. A cor escura é promovida pela presença de detritos finos a grossos de matéria orgânica vegetal, principalmente. Neste conjunto foram identificadas cinco camadas principais, assim representadas da base para o topo por (Figuras 14 e 15):

- 1.) Uma camada marrom inferior (**CMI**) de aspecto silto-argiloso, terroso a compacto, na base, no intervalo de 466-415 cm;
- 2.) Uma camada espessa marrom escura a cinza (**CEI**), com bandas delgadas marrons centimétricas, de aspecto argiloso a silto-argiloso, sobreposta a anterior em contato transicional, no intervalo de 415-230 cm;

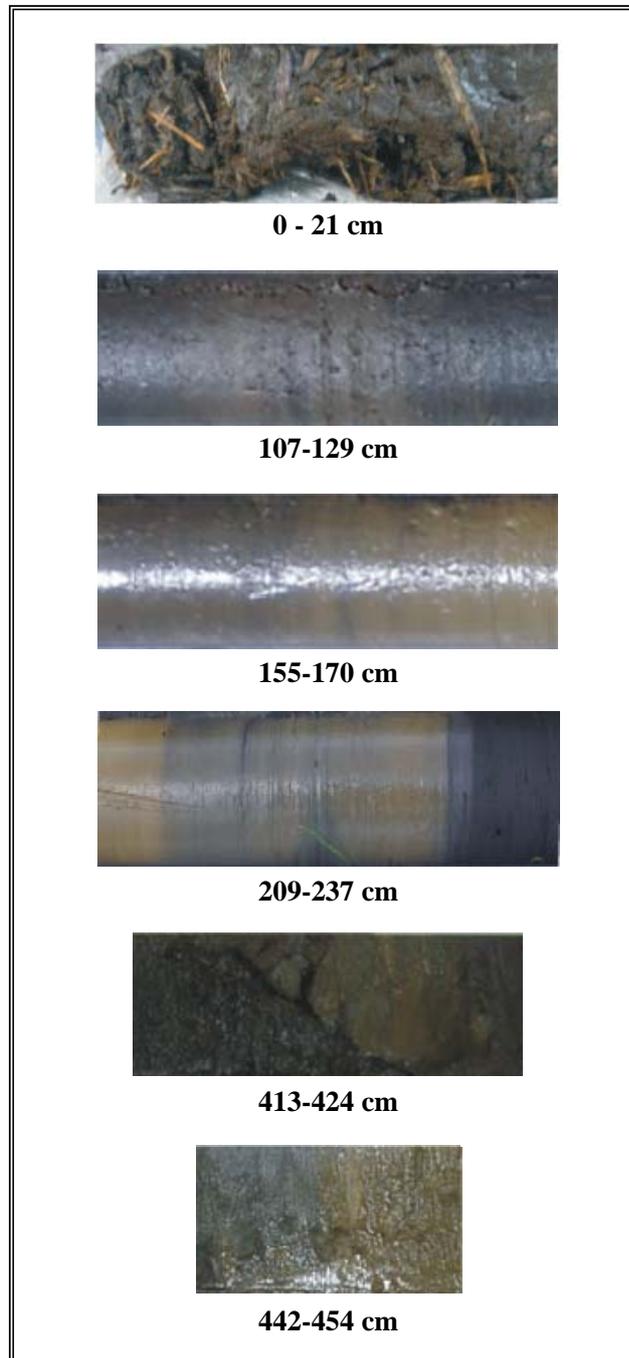
- 3.) Uma segunda camada delgada marrom (**CMS**), com microbandas centimétricas de cor marrom clara ou escura (Figura 14), aspecto argiloso a silto-argiloso, sobrepondo a anterior, no intervalo de 230-155 cm;
- 4.) Uma segunda camada sucessiva para o topo, de cor cinza (**CES**), microbandada, em bandas centimétricas de tom marrom (Figura 14), de aspecto argiloso, no intervalo 155-50 cm;
- 5.) E finalmente uma camada de topo, de cor cinza escura, formada principalmente por detritos de vegetais (**CDO**), ligeiramente bandado e com aspecto argiloso no contato com camada inferior e dominado por detritos orgânicos carbonosos e silicosos para o topo (Figura 14); intervalo de 50-0 cm.

As camadas CES e CDO podem ser englobadas em uma única camada simplesmente CES com uma variação representada por detritos orgânicos para o topo.

Os aspectos microbandados e os contatos entre as camadas principais bem como os detritos da CDO estão indicados na Figura 15.



**Figura 14** – Descrição da sucessão de sedimentos do pântano Mauritia: VM 1 - desenho representativo da imagem digital; VM 2 - imagem digital do perfil; CDO - camada detritos orgânicos; CES - camada escura superior; CMS - camada marrom superior; CEI - camada escura inferior; CMI - camada marrom inferior.



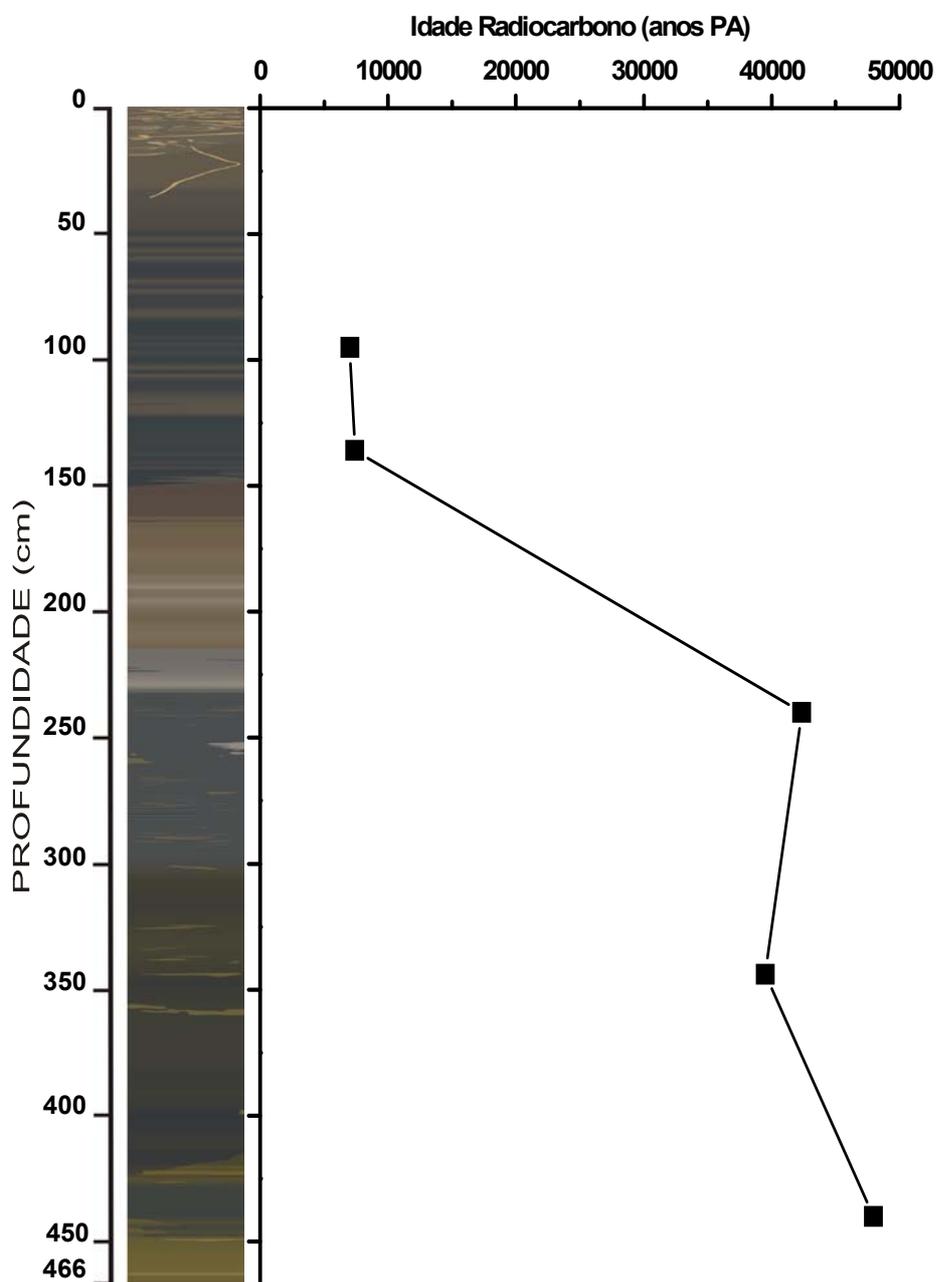
**Figura 15** – Intervalos do perfil do pântano Mauritia destacando os contatos abruptos e os de transição entre as camadas e o bandamento das camadas.

### 3.2 IDADE RADIOCARBONO DOS SEDIMENTOS

Segundo as idades de radiocarbono os sedimentos do pântano Mauritia iniciaram a sua deposição há pelo menos 52.000 anos AP através da camada CMI (Tabela 2). Os dados geológicos de campo mostram que esta sedimentação continua atualmente. Essas mesmas datações mostram, no entanto uma interrupção prolongada de quase 35.000 anos AP entre o topo da camada CMS e a base da CES. As camadas CES e CDO se depositaram nos últimos 7.405 anos AP. Portanto o pântano Mauritia deve ter secado, e até mesmo ter sido exposta a erosão no intervalo entre aproximadamente 40.000 e 8.000 anos AP. Entre 52.000 e 40.000 anos AP o hoje espaço ocupado pelo pântano deve ter representado uma superfície lacustre mais ampla, dominada por sedimentos provenientes das encostas, formadas por crostas lateríticas ferruginosas a ferroaluminosas (Figura 16). A idade máxima destes sedimentos é compatível com os dados de radiocarbono obtidos para os sedimentos da Lagoa Cachoeira (Costa *et al.* 2009) e Lagos da Serra Sul (Soubiés *et al.* 1991) e da Lagoa N4E (Costa *et al.* 2005b). Por outro lado o longo espaço tempo de ausência de registro sedimentar é único.

**Tabela 2** - Os valores de radiocarbono para amostras analisadas.

<b>Nome das amostras</b>	<b>Nº target</b>	<b>PMC</b>	<b>Erro PMC</b>	<b>AP</b>	<b>Erro AP</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>
Mauritia 02/08 – 1 (93 cm)	Erl-12086	41,68	0,26	7030	49	-26,4
Mauritia 02/08 – 2 (134 cm)	Erl-12087	39,78	0,25	7405	50	-25,9
Mauritia 02/08 – 3 (238 cm)	Erl-12088	0,51	0,07	42354	1069	-25,4
Mauritia 02/08 – 4 (342 cm)	Erl-12089	0,73	0,07	39511	781	-27,2
Mauritia 02/08 – 5 (438 cm)	Erl-12090	0,25	0,13	47973	3976	-29,2



**Figura 16** – Perfil quimoestratigráfico com a distribuição das idades de radiocarbono para o pântano Mauritia.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS

As análises granulométricas mostram que os sedimentos do pântano Mauritia são predominantemente silticos, com pouca areia fina e maior contribuição da fração argila. O tamanho médio dos grãos varia de 9,6 a 52,3  $\mu\text{m}$  e diâmetro médio (50%) em torno de 33  $\mu\text{m}$  (Figura 17). Soubiès *et al.* (1991) mostram que os sedimentos coletados em um dos lagos da Serra Sul são constituídos por sedimentos silto-argilosos compreendendo três sucessivos ciclos sedimentares. No lago Cachoeira a fração predominante também é silte variando de 9,5 a 110  $\mu\text{m}$  e diâmetro médio de 53  $\mu\text{m}$  (Costa *et al.* 2009).

As camadas CMI e CMS são mais ricas na fração silte fina e na fração argila do que as CES e CDO. O tamanho dos grãos tende a aumentar em direção aos tempos mais modernos. Camadas de sedimentos distinguidas através de sua coloração e abundância de MO, e agora pela sua granulometria, representam, portanto condições distintas de formação, que se alternaram e se alternam.

A distribuição granulométrica em histogramas para sucessão sedimentar do pântano Mauritia espelha dois nítidos padrões: um unimodal e outro polimodal.

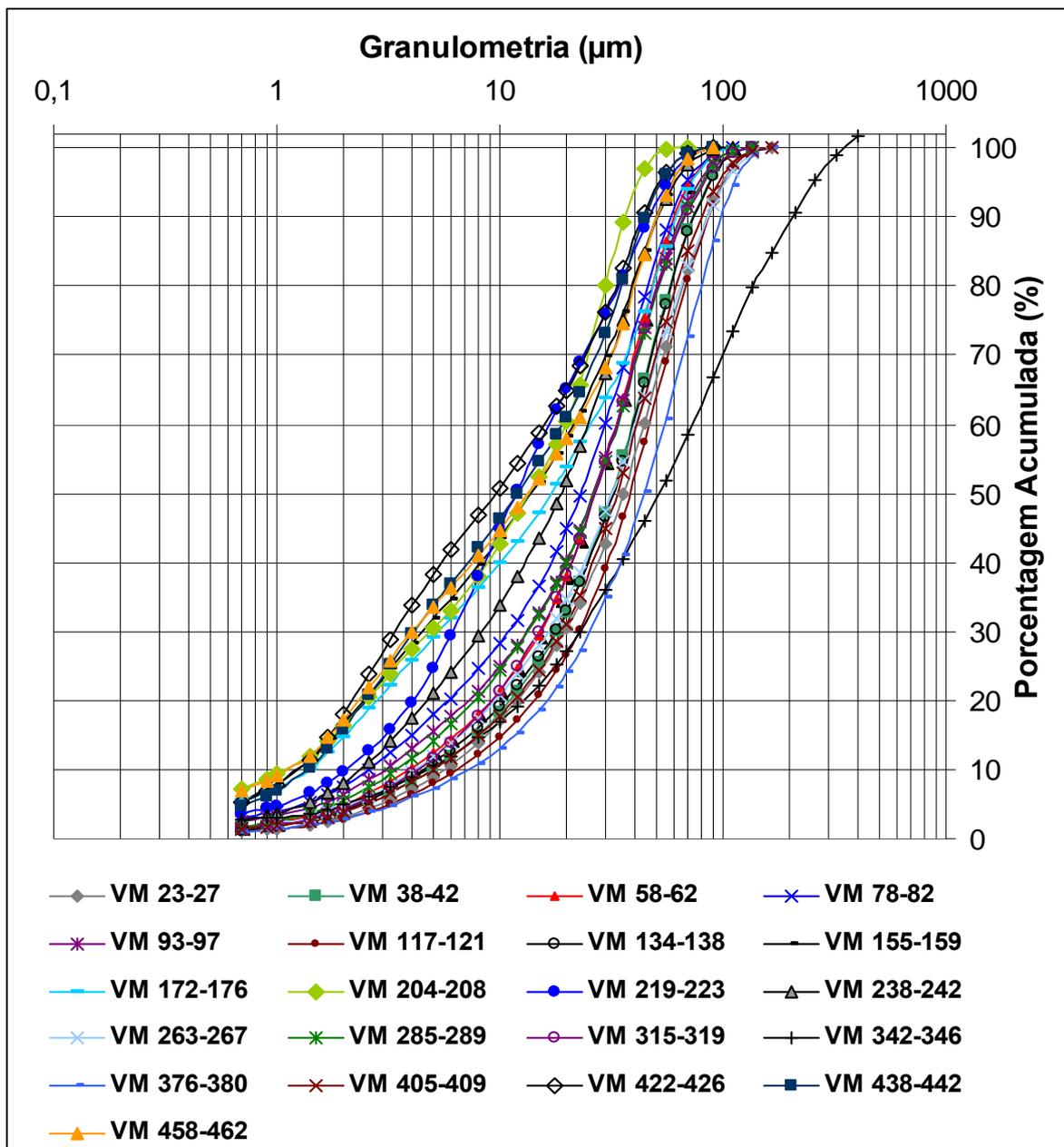
A camada CMI é tipicamente polimodal, com maior frequência média a 460 cm de profundidade, correspondente a 13,46  $\mu\text{m}$ . Esta característica mostra que CMI é mais espessa (422 a 466 cm profundidade) do que admitida, devido a larga zona de transição com CEI (Figura 19).

A camada CEI é predominantemente unimodal, com maior frequência média das partículas variando de 26,86 a 52,33  $\mu\text{m}$ , diminuindo da base para o topo da camada. O carácter transicional com a camada inferior é demonstrada tanto pela diminuição do tamanho médio como pela tendência a bimodalidade. Esta é bem mais forte em relação a camada CES (Figura 19).

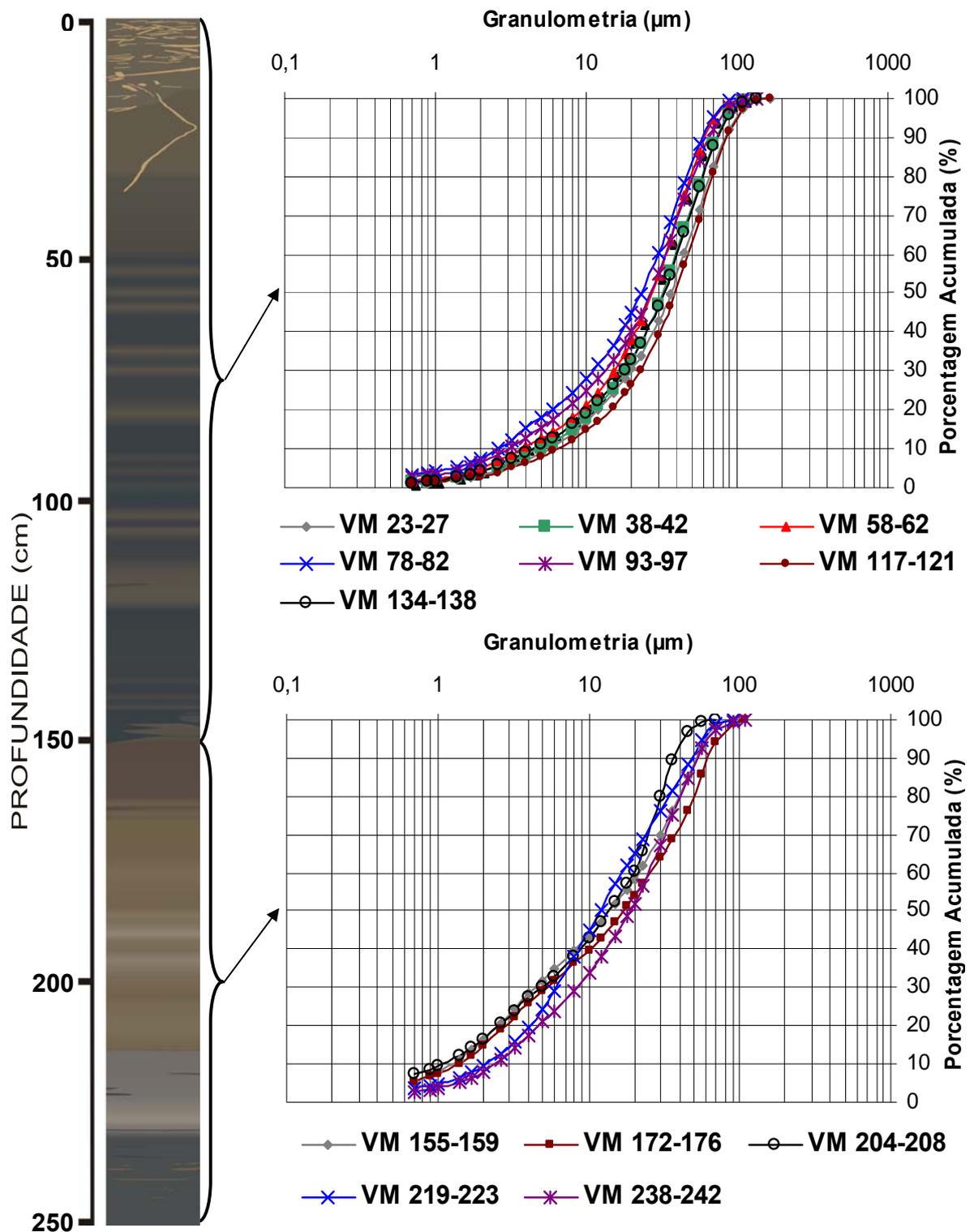
A camada CMS é equivalente a CMI, também tipicamente polimodal, com maior frequência média variando de 11,88 a 18,83  $\mu\text{m}$  (Figuras 18).

As camadas escuras CES e CDO são unimodais, da mesma forma que a camada CEI, com menor frequência média das partículas variando de 23,25 a 38,92  $\mu\text{m}$ , maior a 117 cm de profundidade. A fração 0,7  $\mu\text{m}$  tende a diminuir para o topo da camada. Não se observa qualquer diferença de comportamento entre as camadas CES e CDO, indicando que as mesmas podem constituir uma única camada, quando se considera o domínio do material inorgânico (Figura 18).

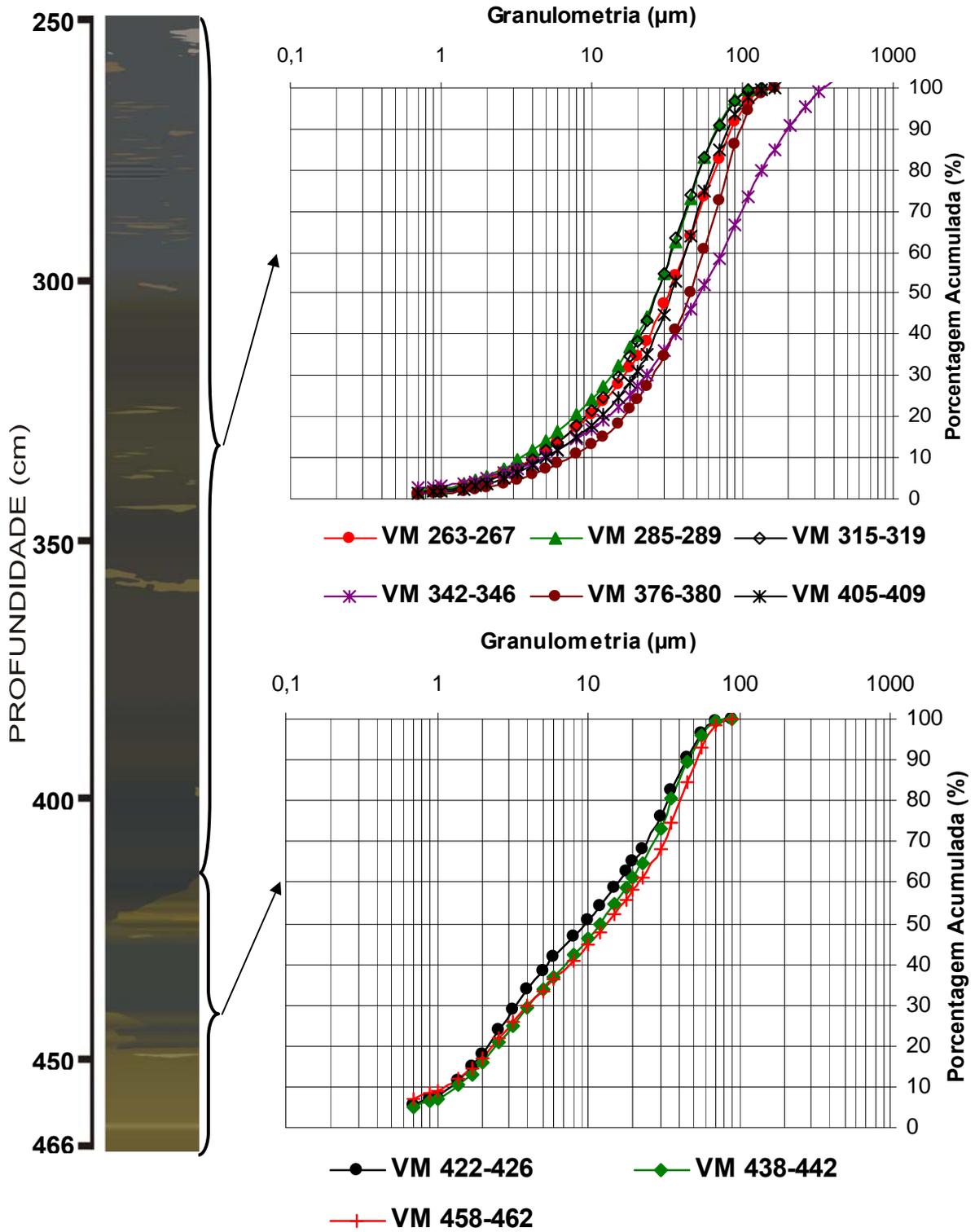
As curvas de distribuição de frequência granulométrica em histogramas mostram claramente que a sequência de sedimentos do pântano Mauritia envolve claramente duas condições de sedimentação-diagênese que se repetem ciclicamente (Figuras 20 a 24).



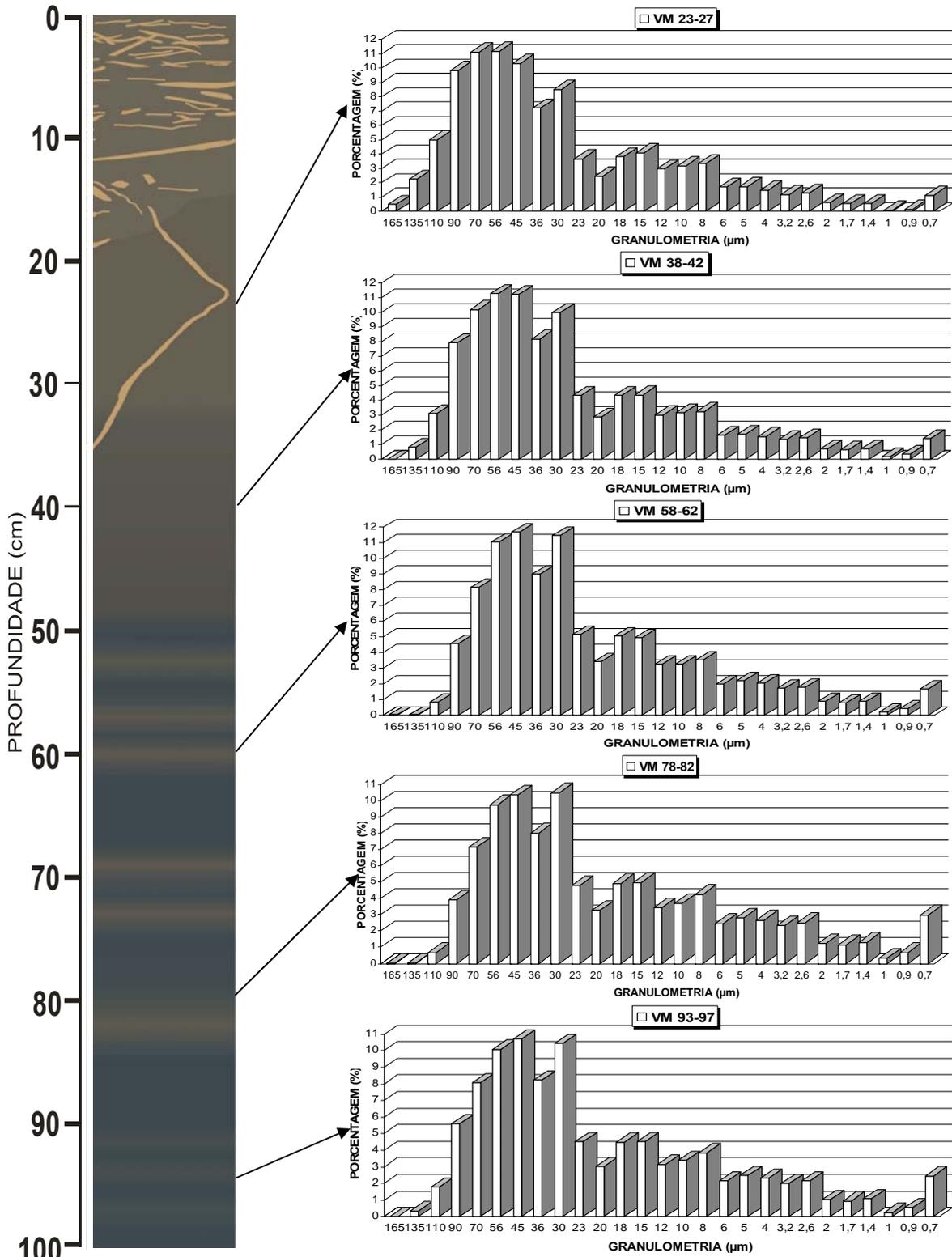
**Figura 17** – Distribuição granulométrica da sucessão sedimentar do pântano Mauritia ressaltando através de curva acumulativa a predominância de areia fina e silte. O diâmetro médio de 50% é de 33  $\mu\text{m}$ .



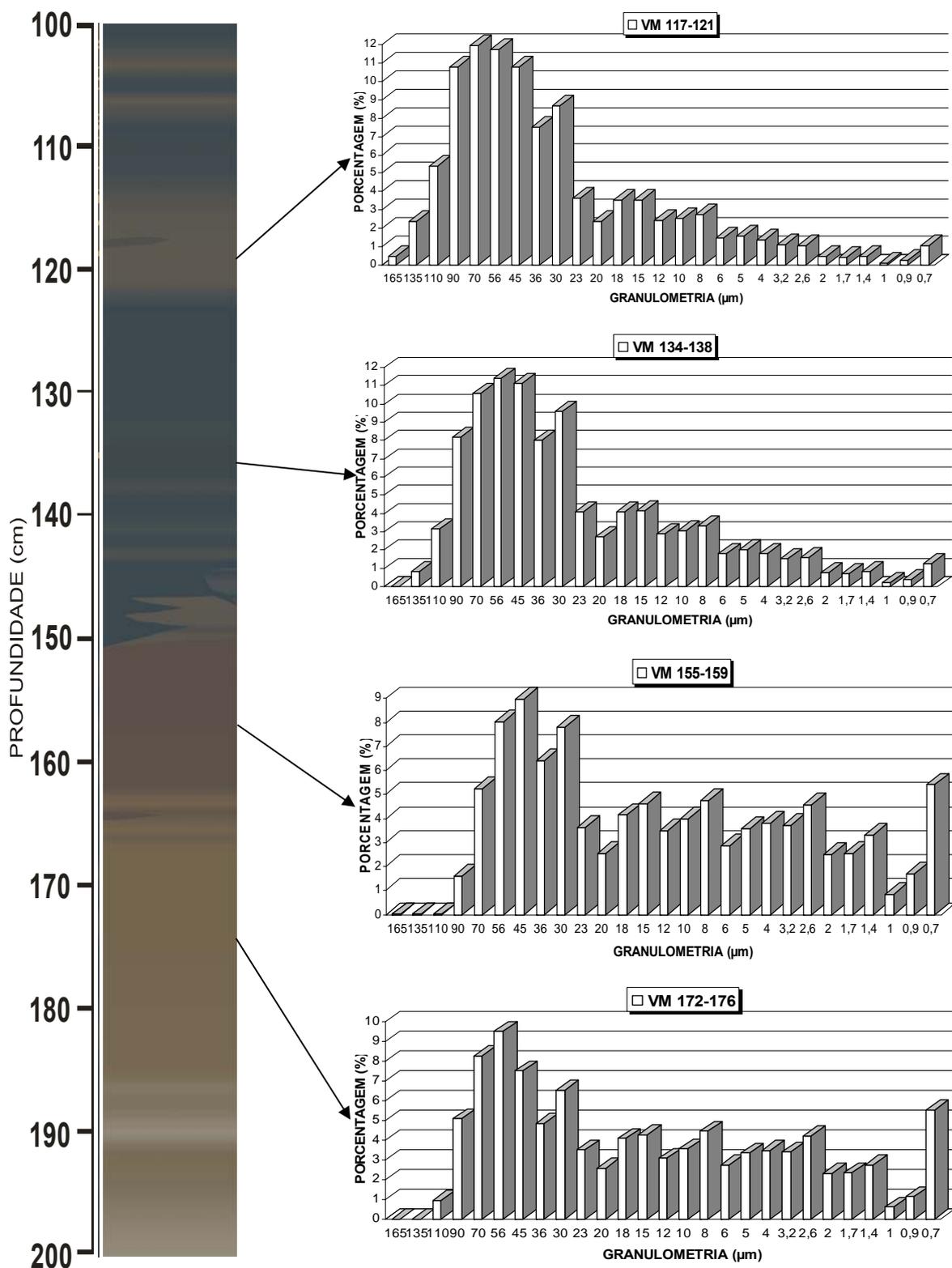
**Figura 18** – Distribuição granulométrica na sucessão sedimentar do pântano Mauritia no intervalo 0-250 cm, destacando duas camadas com padrões de distribuição distintos. Os 155 cm de sedimento a partir do topo apresentam grãos de diâmetro médio de 50% de 29  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição unimodal. O intervalo 155-230 cm apresenta grãos de diâmetro médio de 50% de 15,1  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição polimodal.



**Figura 19** – Distribuição granulométrica na sucessão sedimentar do pântano Mauritia no intervalo 250-466 cm, destacando duas camadas com padrões de distribuição distintos. O intervalo 250-415 cm apresenta grãos de diâmetro médio de 50% correspondente a 36,2  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição unimodal. O intervalo 415-466 cm apresenta grãos de diâmetro médio de 50% correspondente a 11,7  $\mu\text{m}$  com padrão de distribuição polimodal.



**Figura 20** – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente a 100 cm a partir do topo. Similaridade na distribuição de silte e areia fina, com predominância da fração silte.



**Figura 21** – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 100-200 cm. No intervalo 100-150 cm a fração predominante é silte, seguido de um intervalo (150-200 cm) constituído de um material silto-argiloso.

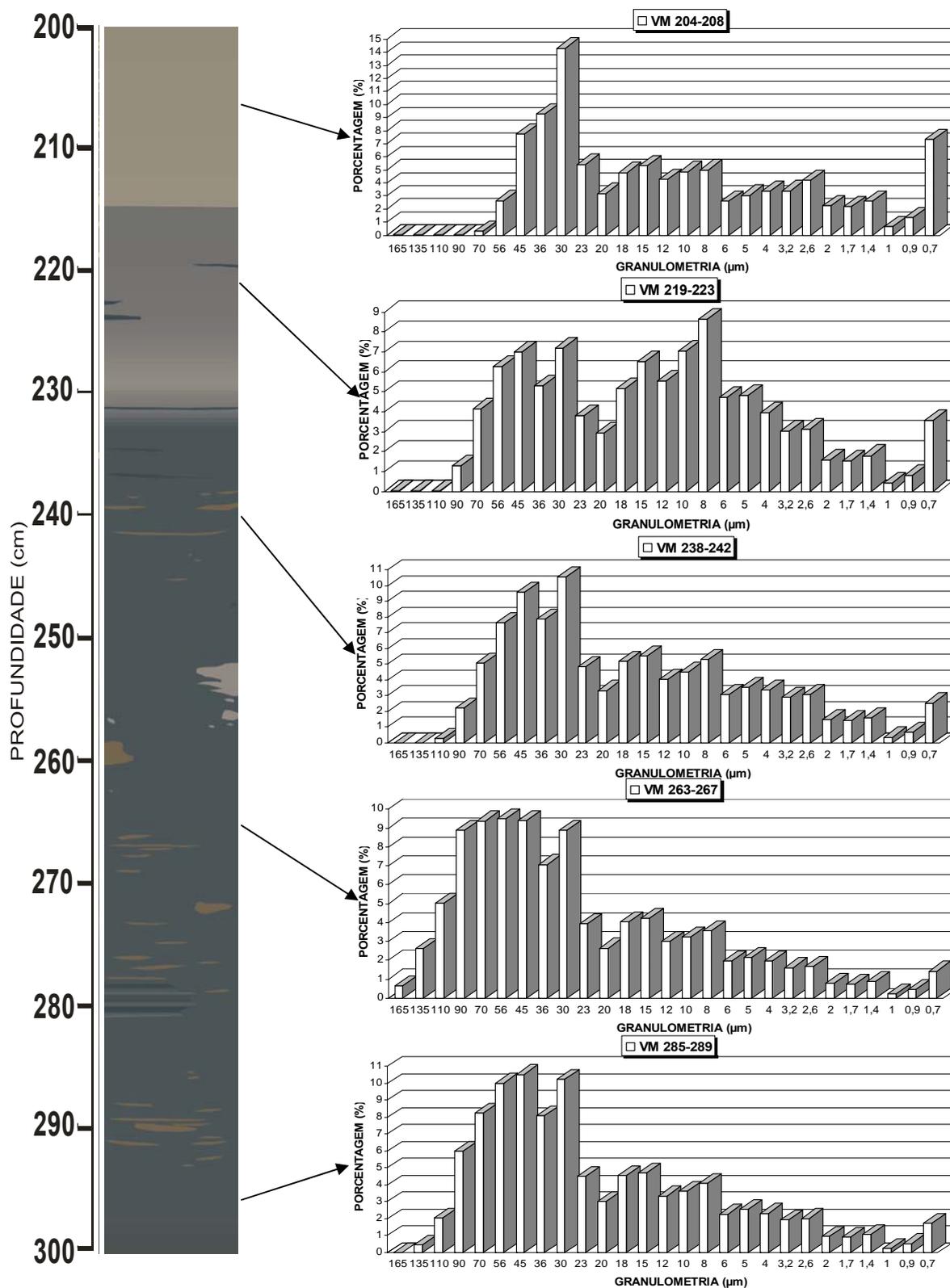
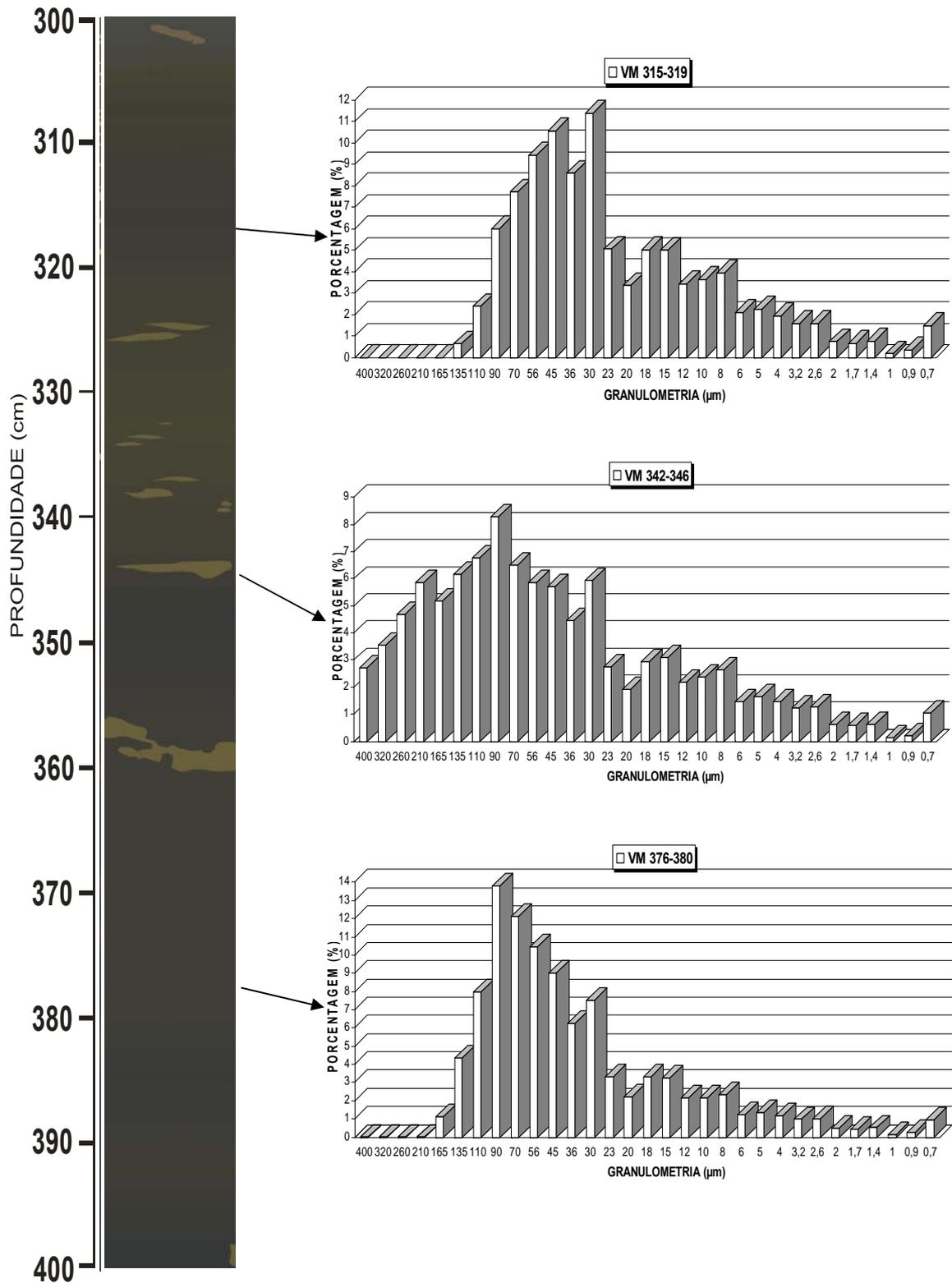
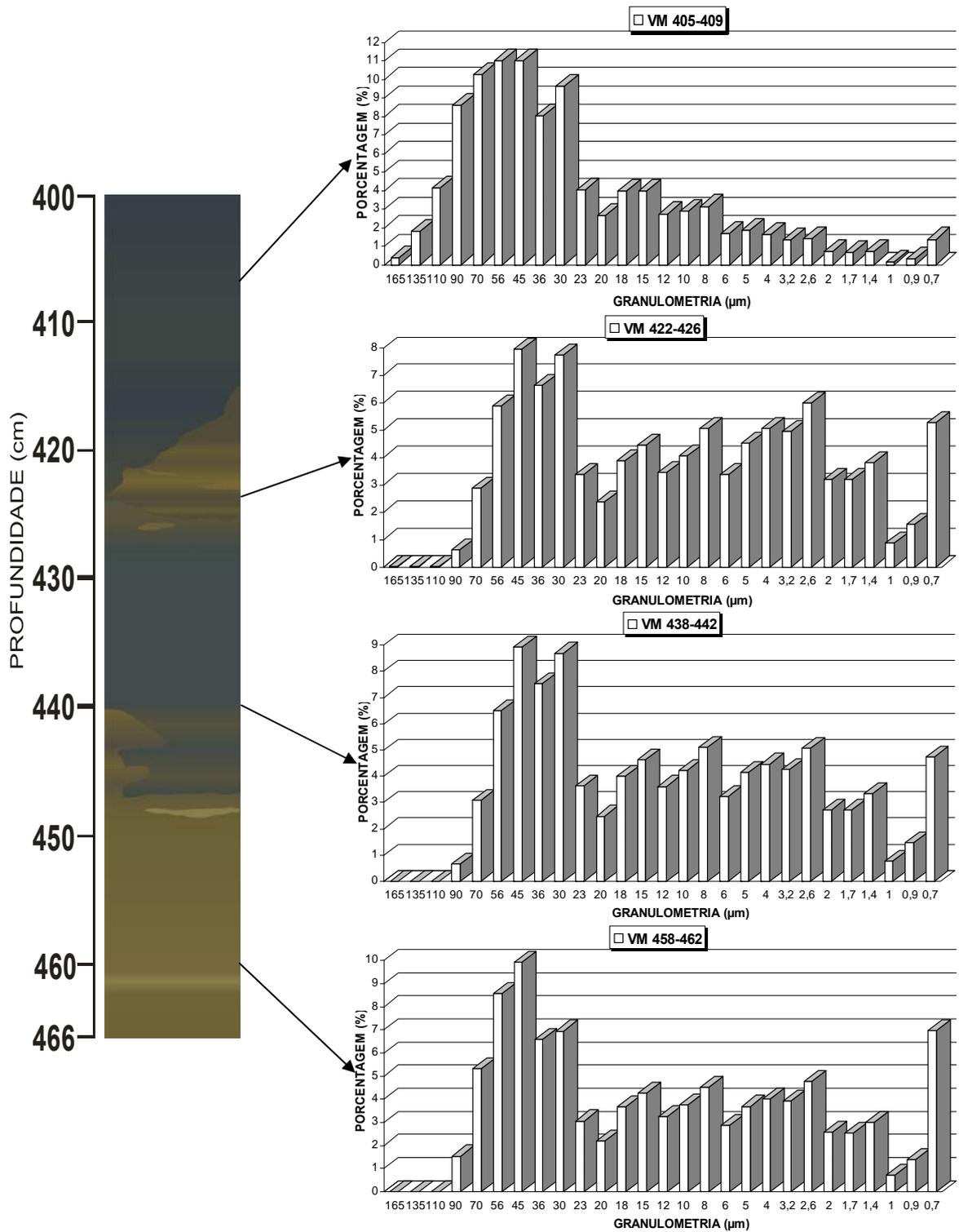


Figura 22 – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 200-300 cm. O intervalo 200-250 cm é constituído por um material silto-argiloso e no intervalo 250-300 a fração predominante é silte.



**Figura 23** – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 300-400 cm. A fração predominante neste intervalo é siltica. Observa-se um aumento dos grãos na profundidade de 344 cm, aumentando a fração areia.



**Figura 24** – Histogramas de distribuição granulométrica correspondente ao intervalo 400-466 cm. A fração predominante neste intervalo é silte-argilosa, com exceção na profundidade 407 cm onde a granulometria é siltica.

### 3.4 MINERALOGIA

Os sedimentos do pântano Mauritia, segundo as análises feitas por DRX e MEV /SED (imagens e micro-análises semiquantitativas), são constituídos de quartzo, opala, caulinita, goethita, siderita, anatásio, além de presença esporádica de gibbsita, barita, talco e/ou clorita (Figura 28) e halita. Espículas silicosas e amorfas, concentrando-se nos 138 cm de sedimento mais recente, foram interpretadas como opala. Além dos minerais os sedimentos podem conter matéria orgânica (Figura 25). Os minerais se distribuem de forma extremamente diferenciada no perfil em profundidade, em parte ligados as diferentes camadas, indicadas por variação na coloração (tons de marrons e cor cinza) e na textura.

O quartzo está presente em quase toda sequência, sendo raro nos últimos 40 centímetros do topo da sequência (Figuras 26 e 27). É mais abundante nas camadas cinza do que nas marrons e encontra-se em pequenas concentrações nas concreções ou agregados de siderita. As concentrações de quartzo parecem diminuir da base para o topo, e sua formação sugere estar ligada às mineralizações das espículas silicosas de cauxi, e ainda as diatomáceas nas camadas mais antigas. São raros os grãos de quartzo (Figuras 29, 32-35, 37, 40 e 41).

A caulinita é também um mineral abundante, com distribuição ligeiramente semelhante a do quartzo, rara a ausente nos últimos 120 cm do topo e menos freqüente nas camadas marrons, geralmente ricas em goethita e/ou siderita e mais abundante nas camadas cinza (Figuras 29, 33-42). Os espectros de DRX mostram tratar-se de caulinita nanocristalina de baixo grau de ordem cristalina, indicado pela ausência do triplé a 4,3 Å. (Figuras 29, 33, 37 e 40). Sua origem parece também ligada a decomposição das formas silicosas como cauxi e diatomáceas e dos minerais como OHFe (Al-goethita) e OHAl (gibbsita), encontrados também nas crostas lateríticas no entorno do lago e certamente carregados para a lagoa, pré-pântano.

A goethita, já mencionada anteriormente, é também um mineral abundante, nanocristalina, com distribuição irregular, intimamente relacionada com as camadas marrons, portanto menos freqüente nas camadas cinza (Figuras 29-35, 39-43). Está ausente nos últimos 120 cm do topo dos sedimentos. Ou seja, as crostas atuais pouco contribuem com detritos para a camada CDO.

A siderita é outro mineral importante, também já referida, nos sedimentos do pântano Mauritia, e está intimamente relacionada com as camadas marrons, ao lado da goethita, da qual

parece ter sido formada. Ao contrário dos demais minerais mencionados, apresenta-se em cristais micrométricos a submilimétricos, por vezes euédricos (romboédricos), conferindo ao material como um todo, um aspecto arenoso friável. Ela pode ser o mineral principal das camadas marrons, principalmente nos intervalos próximos a 460 cm e 205 cm e 173 cm de profundidade, que correspondem as duas principais camadas de sedimentos marrons (Figuras 29, 31-33, 40, 42 e 43). Por outro lado as análises de MEV-SED mostram que a siderita encontra-se também dispersas nas microbandas marrons dentro camada cinza (Figuras 30, 36, 38 e 39).

Material opalino foi inferido através dos difratogramas de DRX, que mostram uma barriga acentuada na faixa de 4,1 a 4,3 Å, que corresponde a presença de opala e que coincide em parte as amostras com o domínio de espículas de cauxi e mesmo fragmentos de diatomáceas (Figuras 25 e 26). Teores elevados de SiO<sub>2</sub> ao lado da ausência ou raridade de quartzo, foram atribuídos a ocorrência de opala amorfa associada aos materiais orgânicos (Figura 27). Opala concentra-se principalmente no intervalo superior, nos últimos 138 cm (onde se pode ainda visualizar as espículas de cauxi) (Figura 25, imagem E) e ainda foi observada a 220 cm de profundidade (Figuras 34 e 35). Isto parece demonstrar que a opala gradualmente foi transformada em quartzo e caulinita, ou então que as primeiras camadas foram pobres em espículas e diatomáceas.

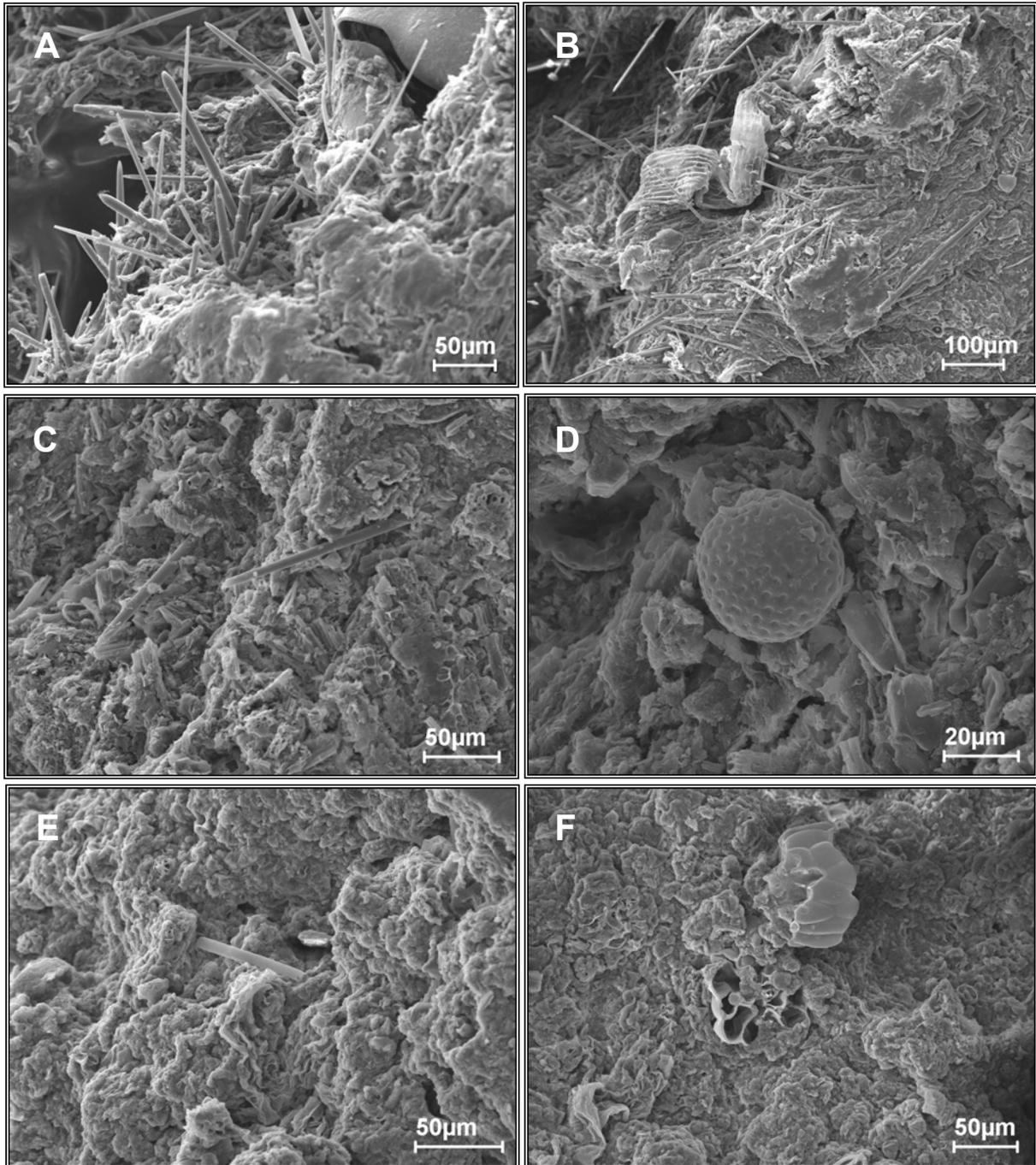
O anatásio é um acessório comum em quase toda sequência, exceto no topo (nos últimos 130 cm) praticamente ausente, e se apresenta também como material nanocristalino, disperso na matriz formada por quartzo, caulinita, goethita e siderita, nas duas camadas marrons (Figuras 29, 37 e 40). Nos domínios de agregados de siderita o anatásio é raro. Os teores de anatásio são inferiores a 2,36 % segundo as análises químicas totais (31, 33-35, 38, 41 e 42).

A barita foi encontrada com frequência somente na base da sucessão sedimentar, a 423 cm de profundidade, em cristais micrométricos tabulares e euédricos, isolados. Foi identificada apenas por MEV-SED e pode ser inferida pelas as análises químicas totais (Figuras 41 e 42).

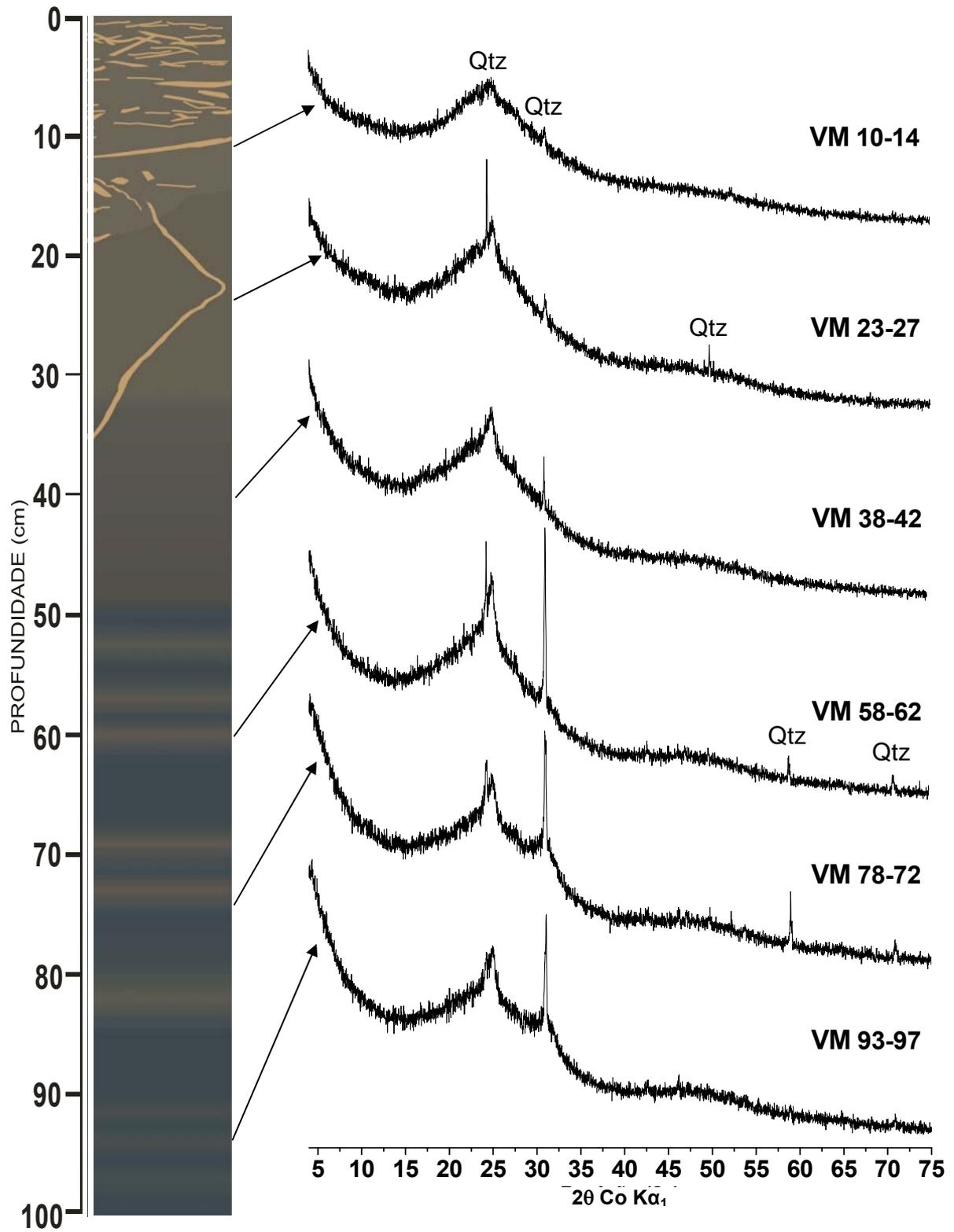
**Tabela 3** – Concentrações de  $C_{tot}$  e  $S_{tot}$  em amostras dos sedimentos do pântano Mauritia.

<b>Amostras</b>	<b>Camada Sedimentar</b>	<b><math>C_{tot}</math></b>	<b><math>S_{tot}</math></b>
VM 263-267	CEI	48,45	0,71
VM 342-346	CEI	34,3	0,73
VM 405-409	CEI	48,16	0,99
VM 422-426	CMI	11,74	0,34

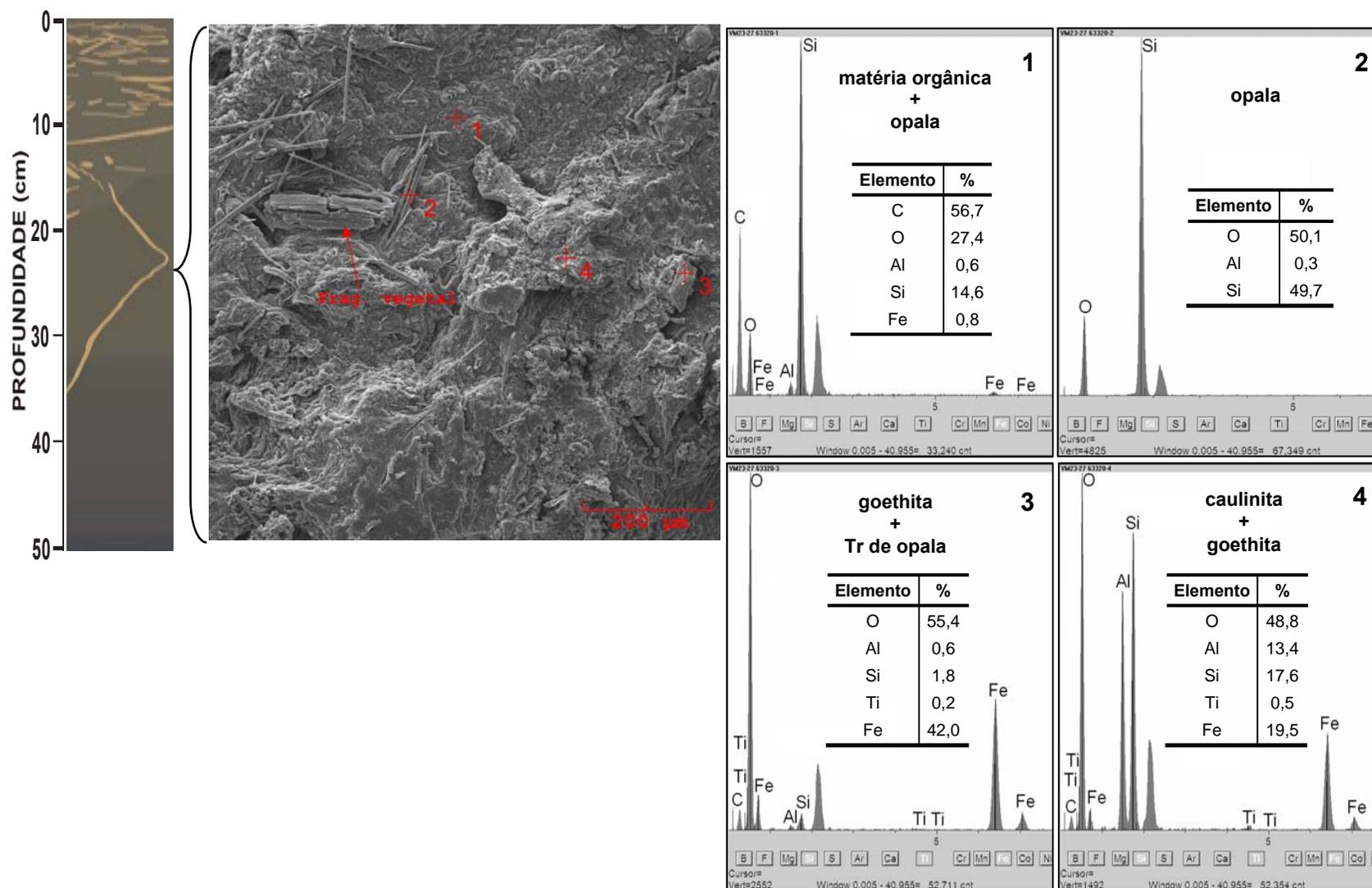
Cristais de gibbsita também foram encontrados dispersos, como mostram as análises MEV-SED de amostras a 423 cm profundidade (Figura 41). A presença de gibbsita ressalta a filiação dos sedimentos às fontes com crostas lateríticas, que se encontram adjacentes ao pântano Mauritia. Essas raras ocorrências de gibbsita são certamente sobreviventes das transformações mineralógicas diagenéticas ocorridas na base do pacote sedimentar, que a transformou em caulinita, ao entrarem em contato com as substâncias opalinas.



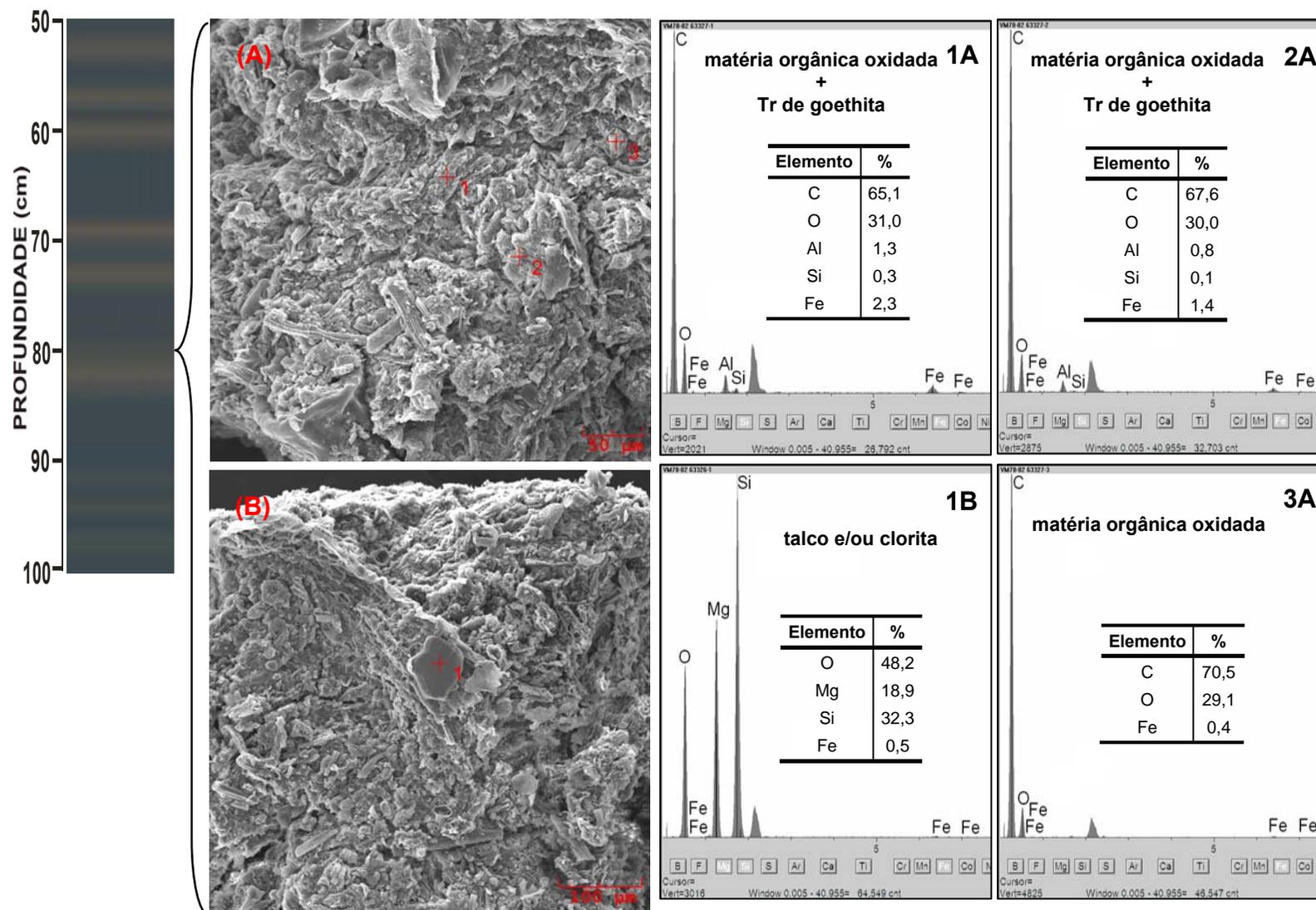
**Figura 25** – Imagens de MEV correspondem aos 138 cm mais recente, destacando a predominância de espículas silicosas e amorfas, além da matéria orgânica (imagens A, B correspondem a profundidade de 25 cm; C e D correspondem a profundidade de 80 cm; E e F correspondem a profundidade de 138 cm).



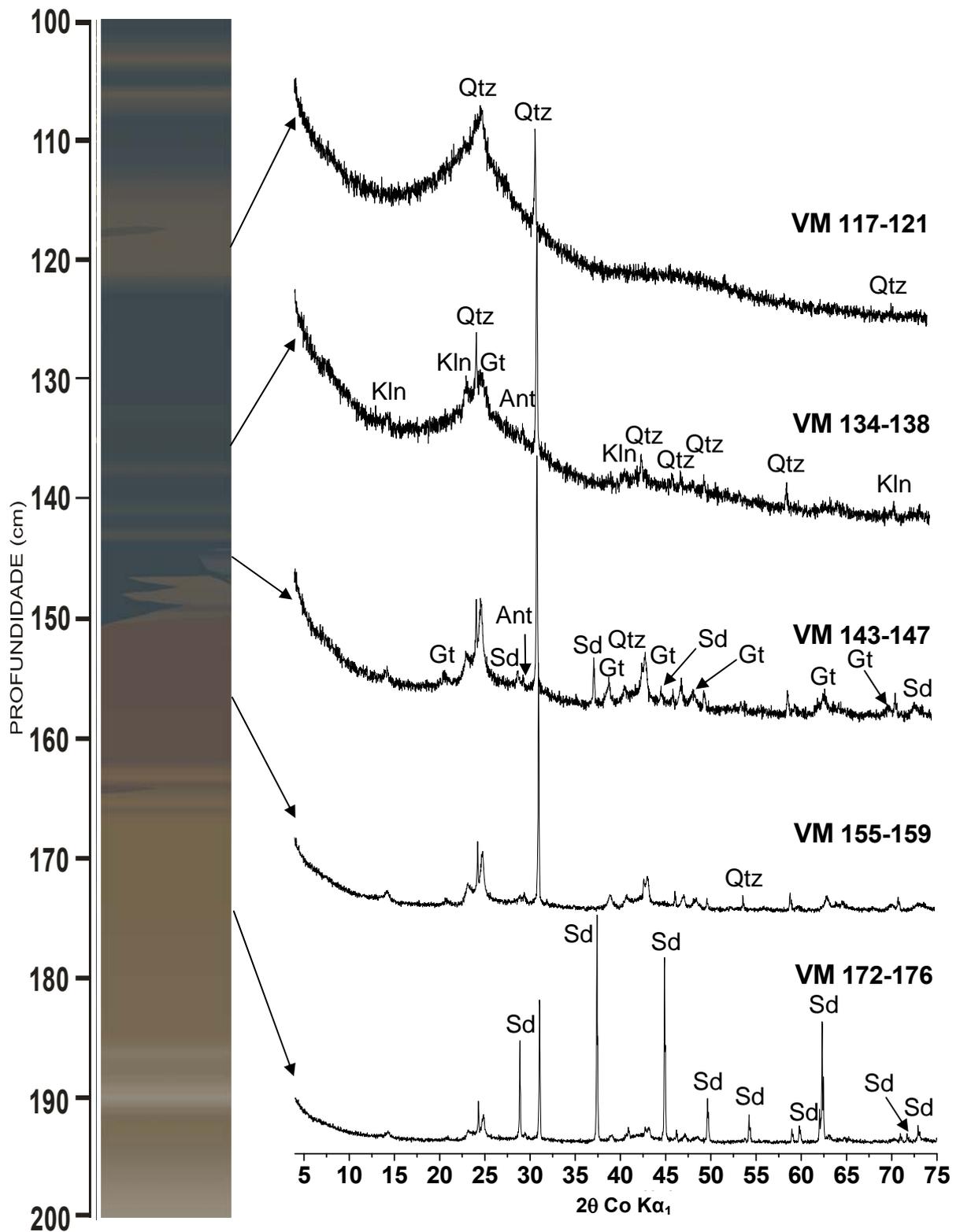
**Figura 26** – Constituição mineralógica dos primeiros 100 cm, a partir do topo, da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz - quartzo.



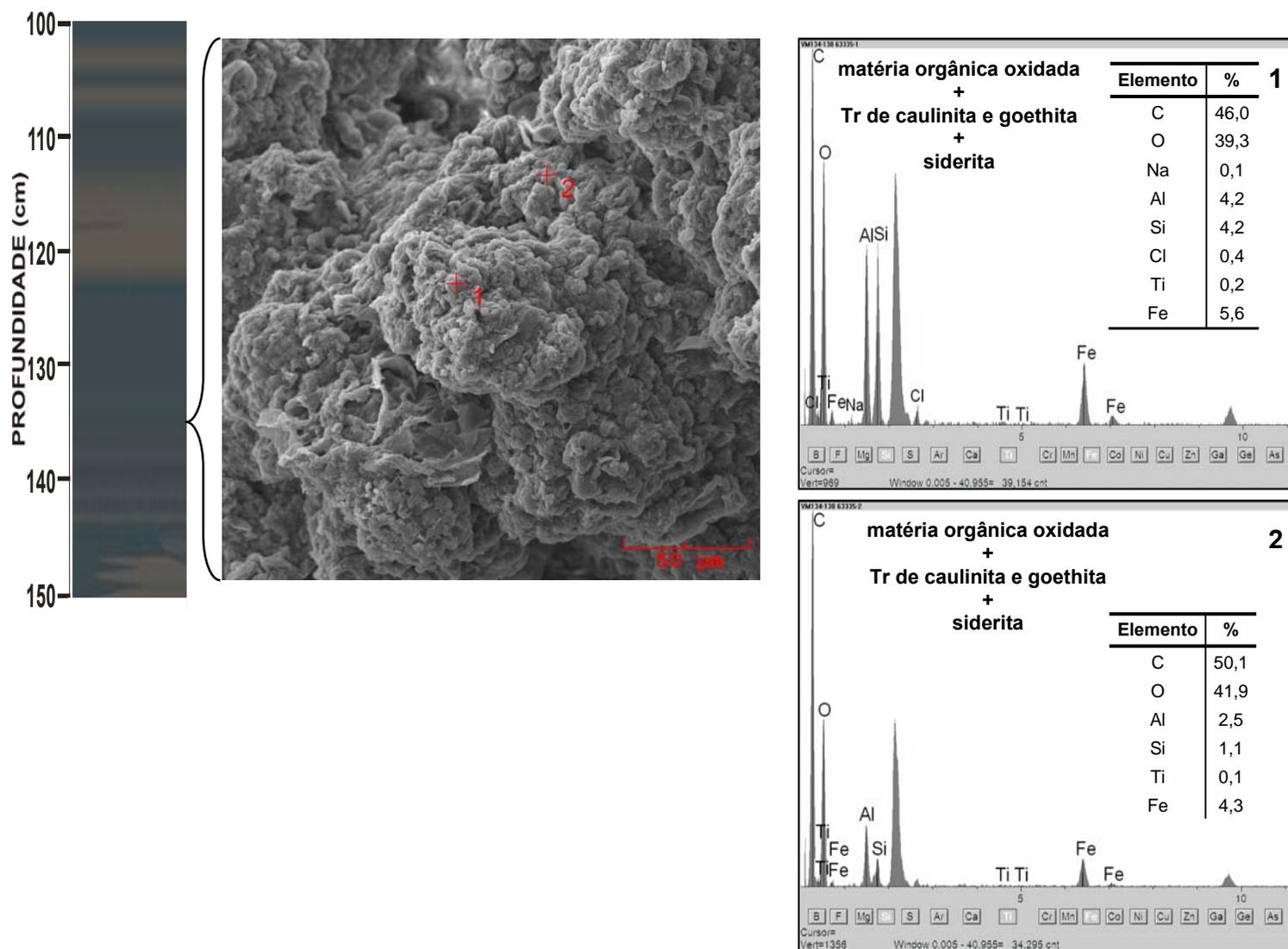
**Figura 27** - Imagem MEV da amostra VM 23-27, destacando fragmentos de vegetal e espículas silicosas, associadas aos espectros de SED de microanálises semiquantitativas com respectivos pontos analisados de 1 a 4.  
Tr – traços.



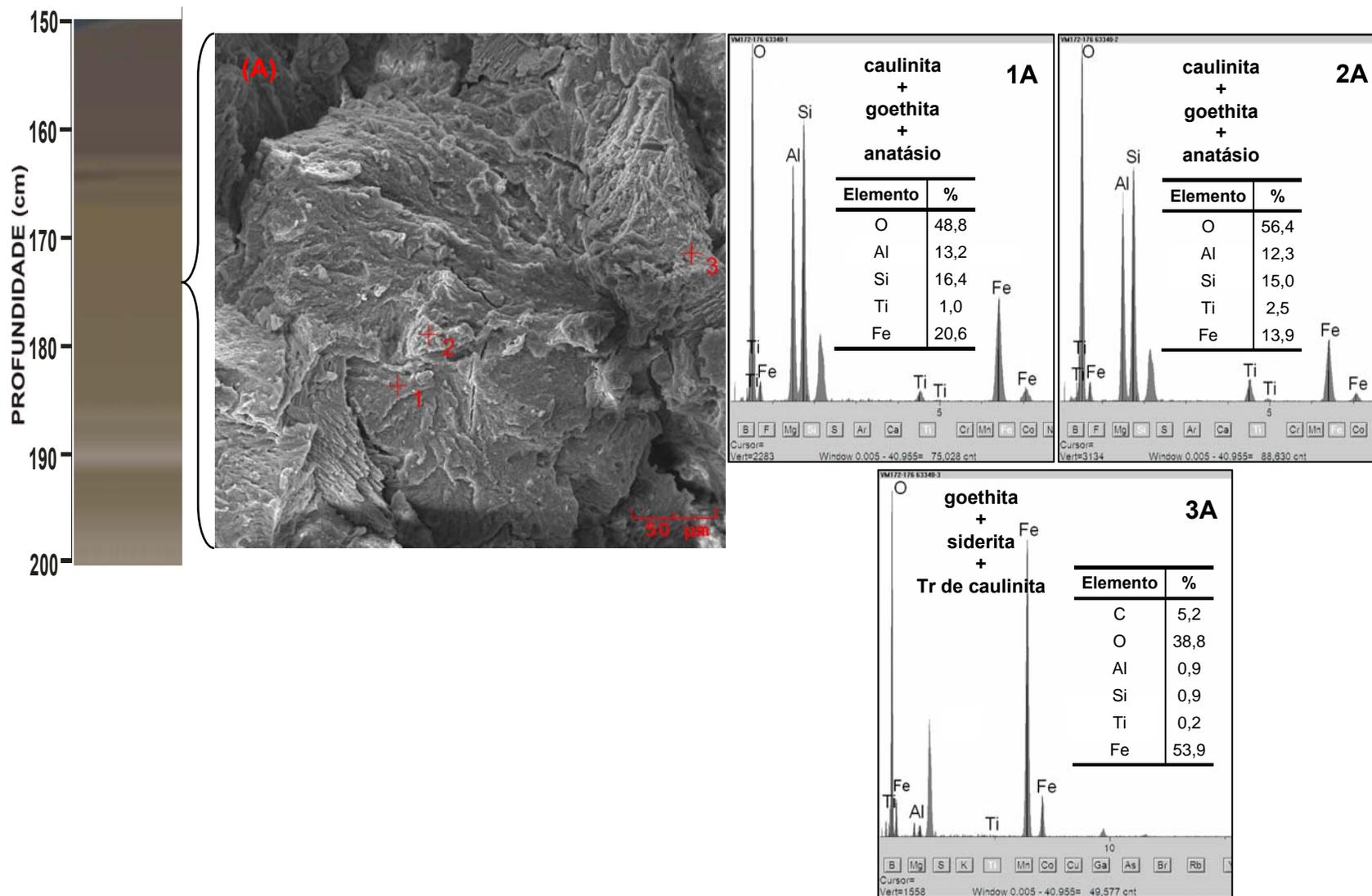
**Figura 28** - Imagens MEV da amostra VM 78-82 (A e B), destacando um material predominantemente amorfo com fragmentos de vegetal, associadas aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas: 1A a 3A, respectivos à imagem A, e 1B, respectivo à imagem B. Tr - traços.



**Figura 29** – Constituição mineralógica do intervalo de 100-200 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Gt - goethita; Kln – caulinita; Ant – anatásio; Sd – siderita.

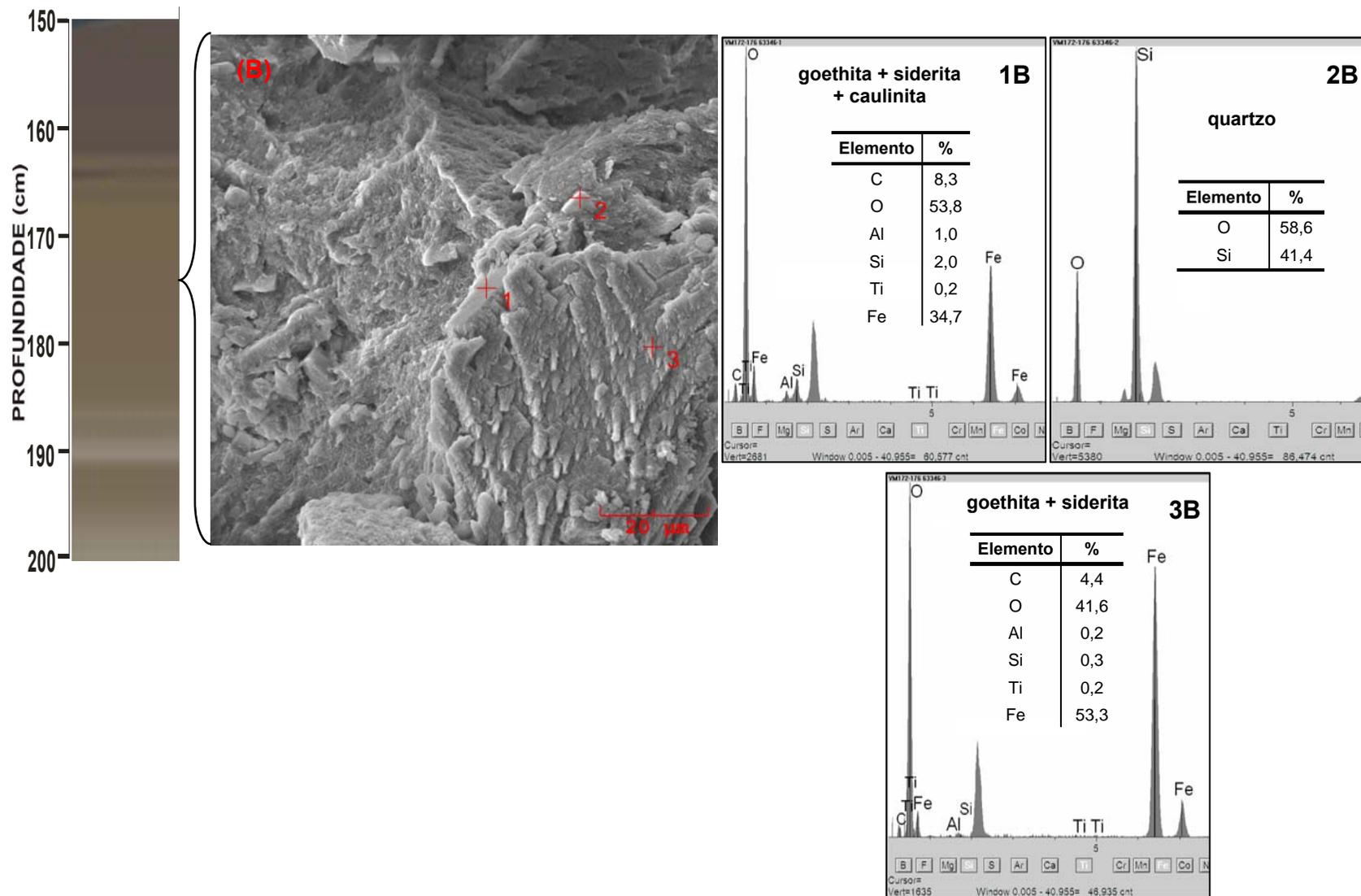


**Figura 30** - Imagem MEV da amostra VM 134-138, destacando um material rico predominantemente constituído de matéria orgânica, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas com respectivos pontos analisados: 1e 2. Tr – traços.

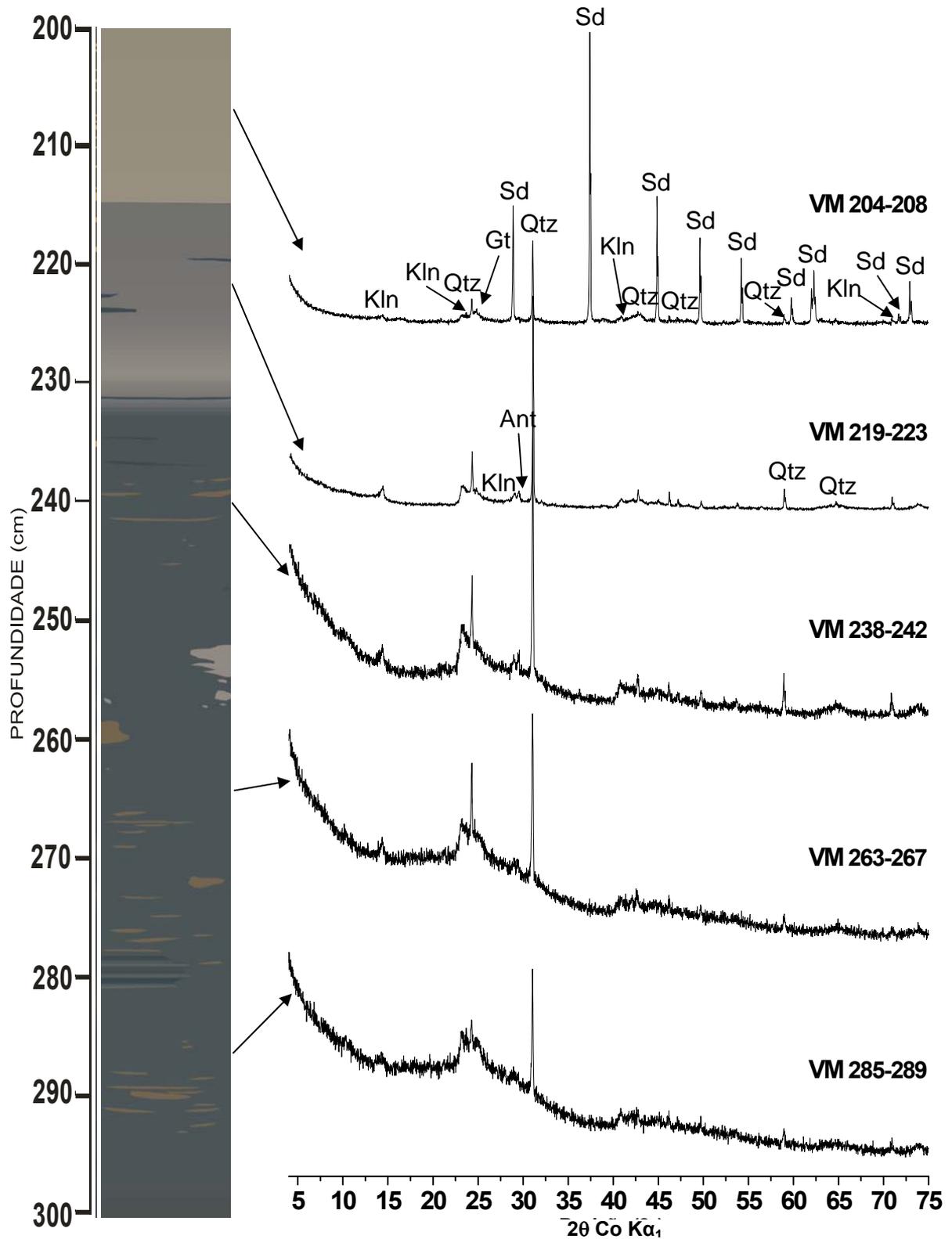


**Figura 31** - Imagem MEV da amostra VM 172-176 (A), destacando um material predominantemente microcristalino, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1A a 3A.

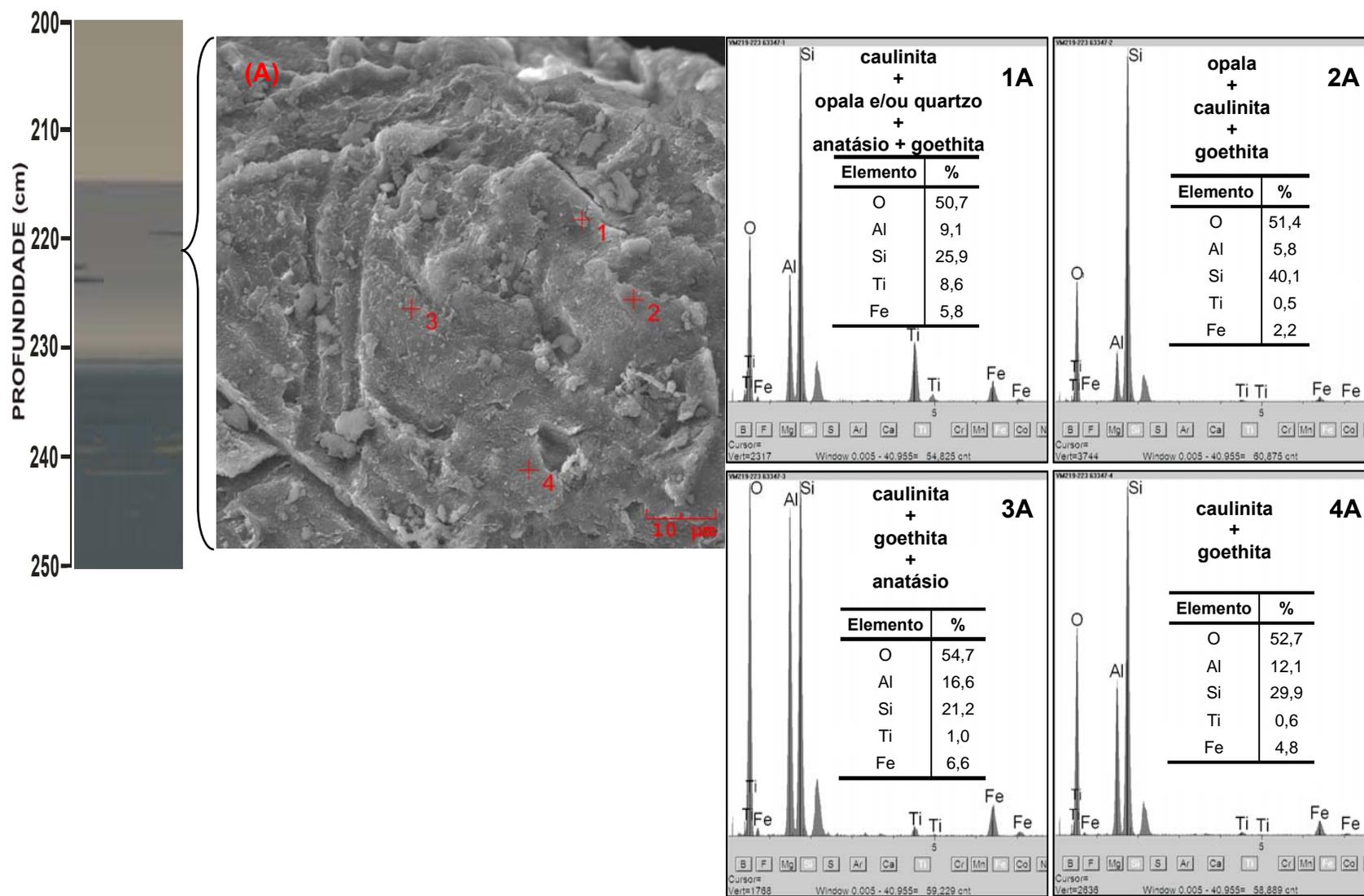
Tr – traços.



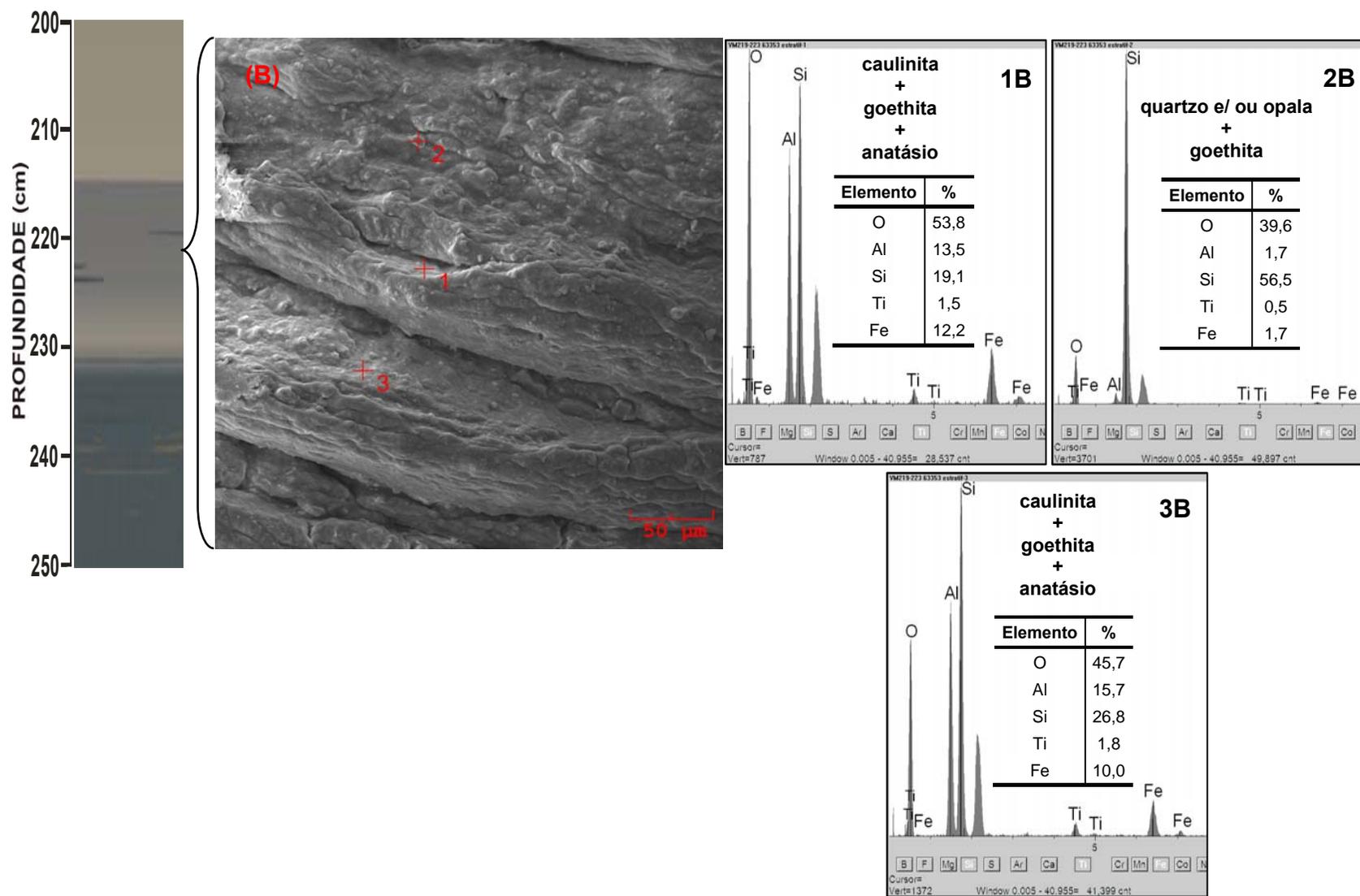
**Figura 32** - Imagem MEV da amostra VM 172-176 (B), destacando um material microcristalino, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1B a 3B.  
Tr – traços.



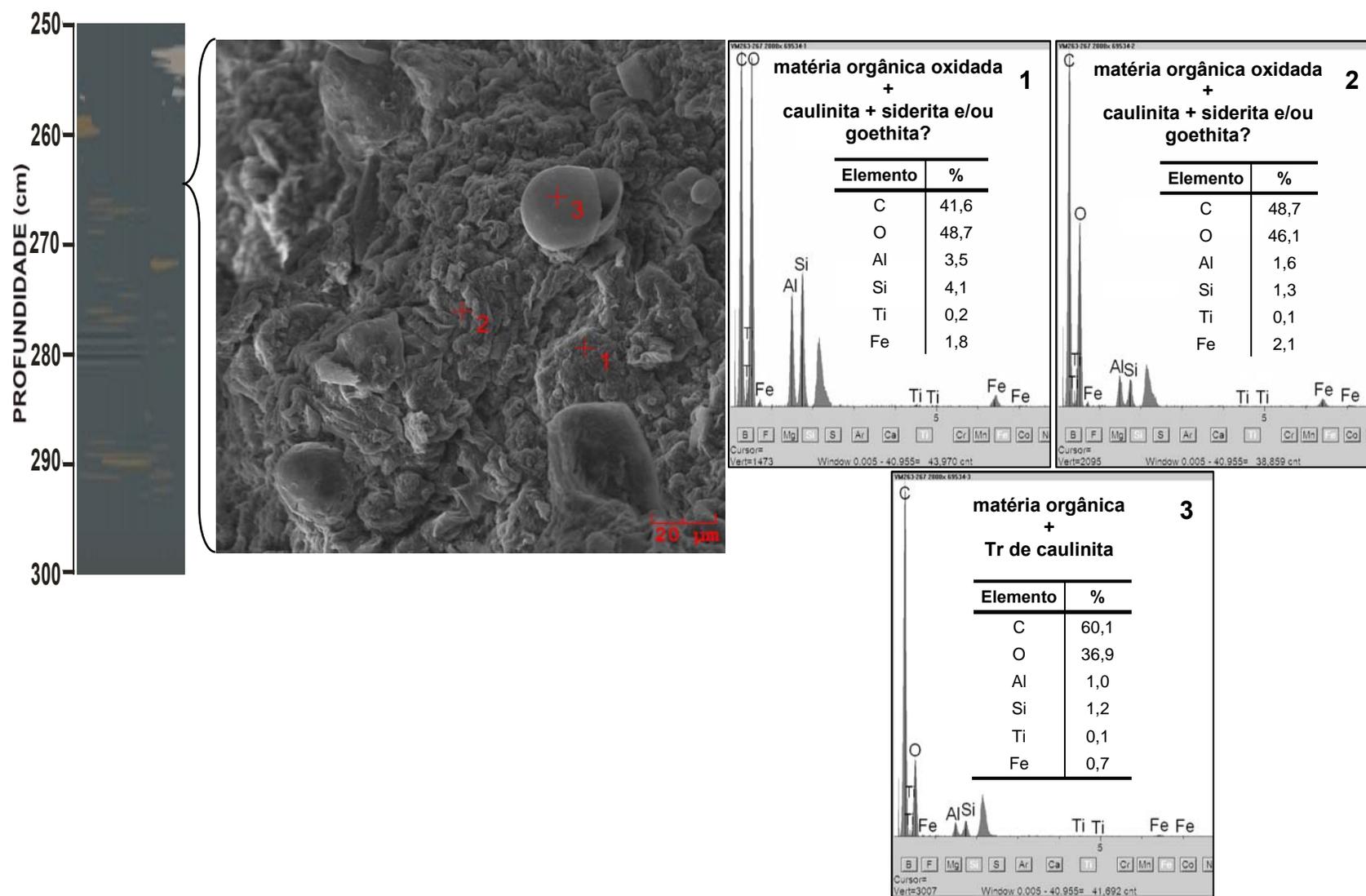
**Figura 33** – Constituição mineralógica do intervalo de 200-300 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Gt – goethita; Kln – caulinita; Ant – anatásio; Sd – siderita.



**Figura 34** - Imagem MEV da amostra VM 219-223 (A), destacando uma superfície da caulinita, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1A a 4A.

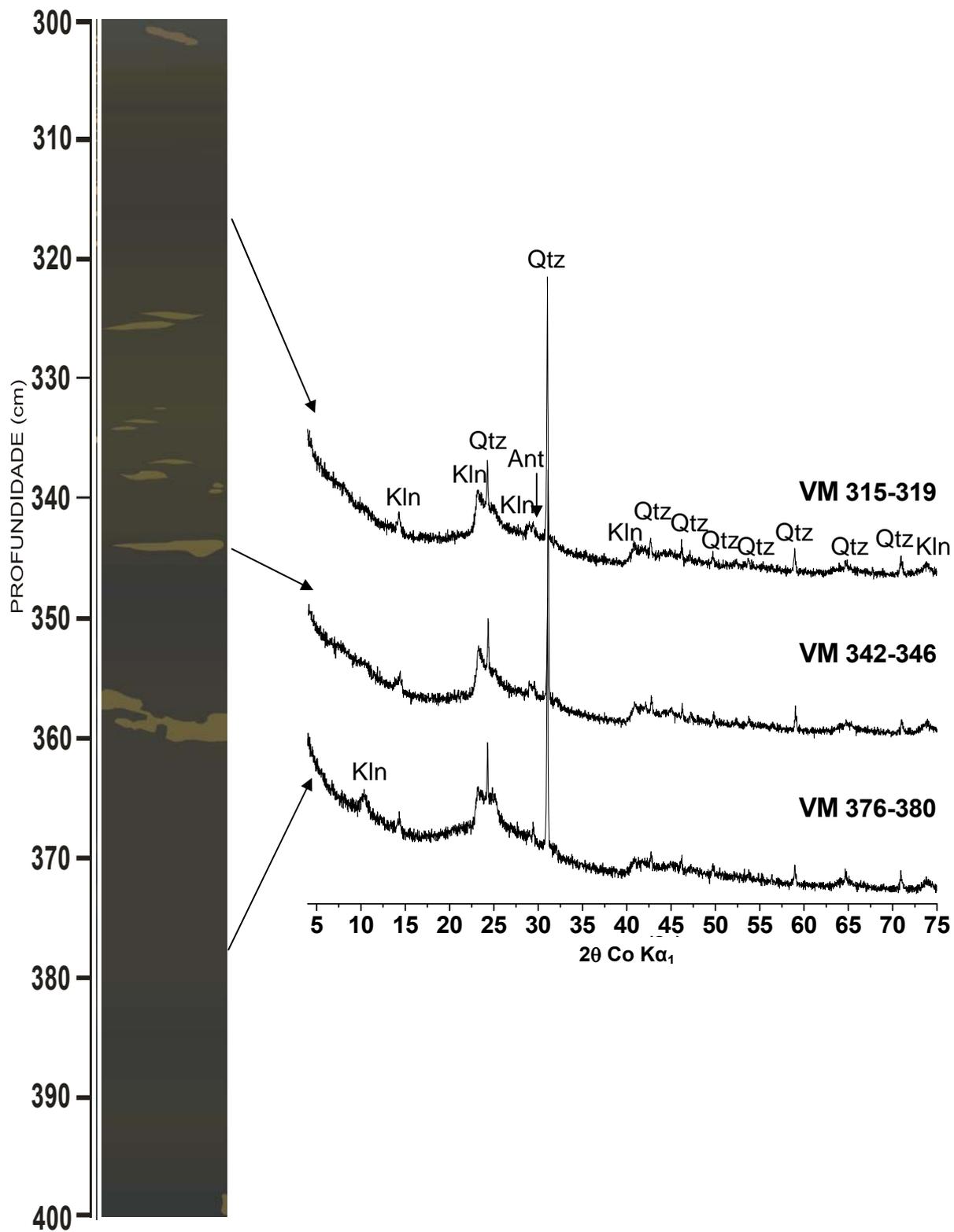


**Figura 35** - Imagem MEV da amostra VM 219-223 (B), destacando sucessões sedimentares, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas identificados de acordo com os pontos analisados de 1B a 3B.

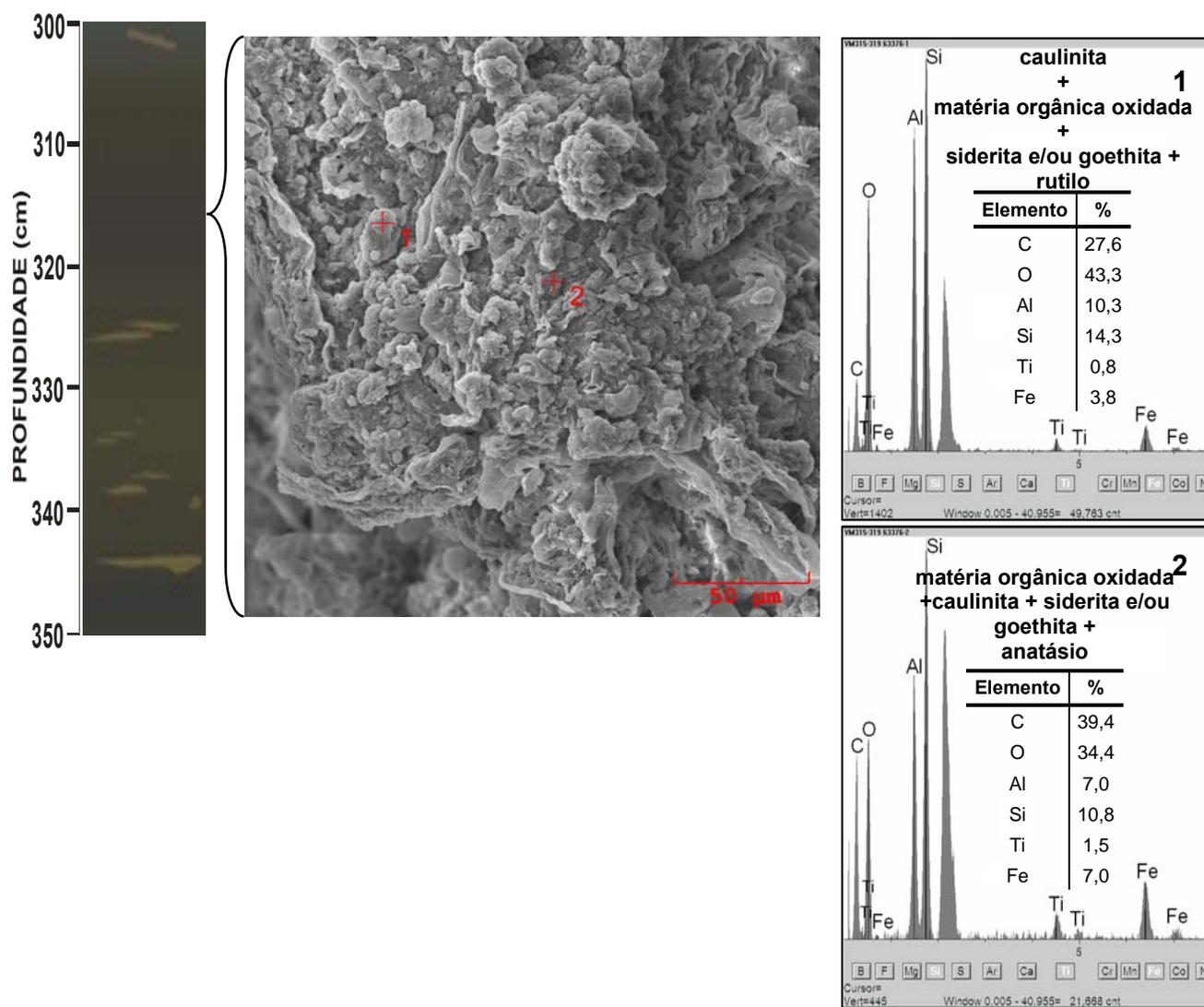


**Figura 36** - Imagem MEV da amostra VM 263-267, destacando um material predominantemente amorfo com fragmentos de vegetal, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes aos pontos analisados de 1 a 3.

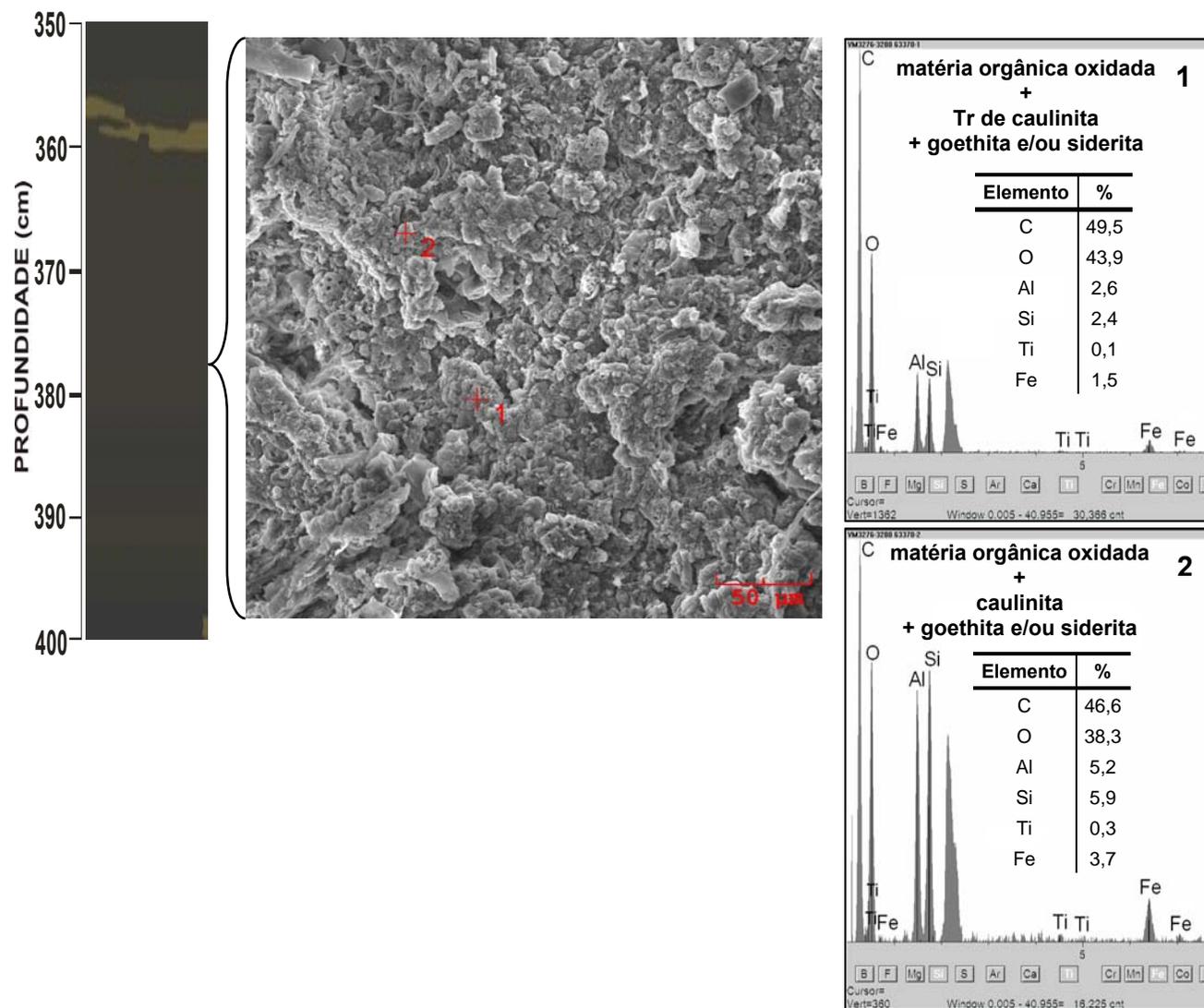
Tr – traços.



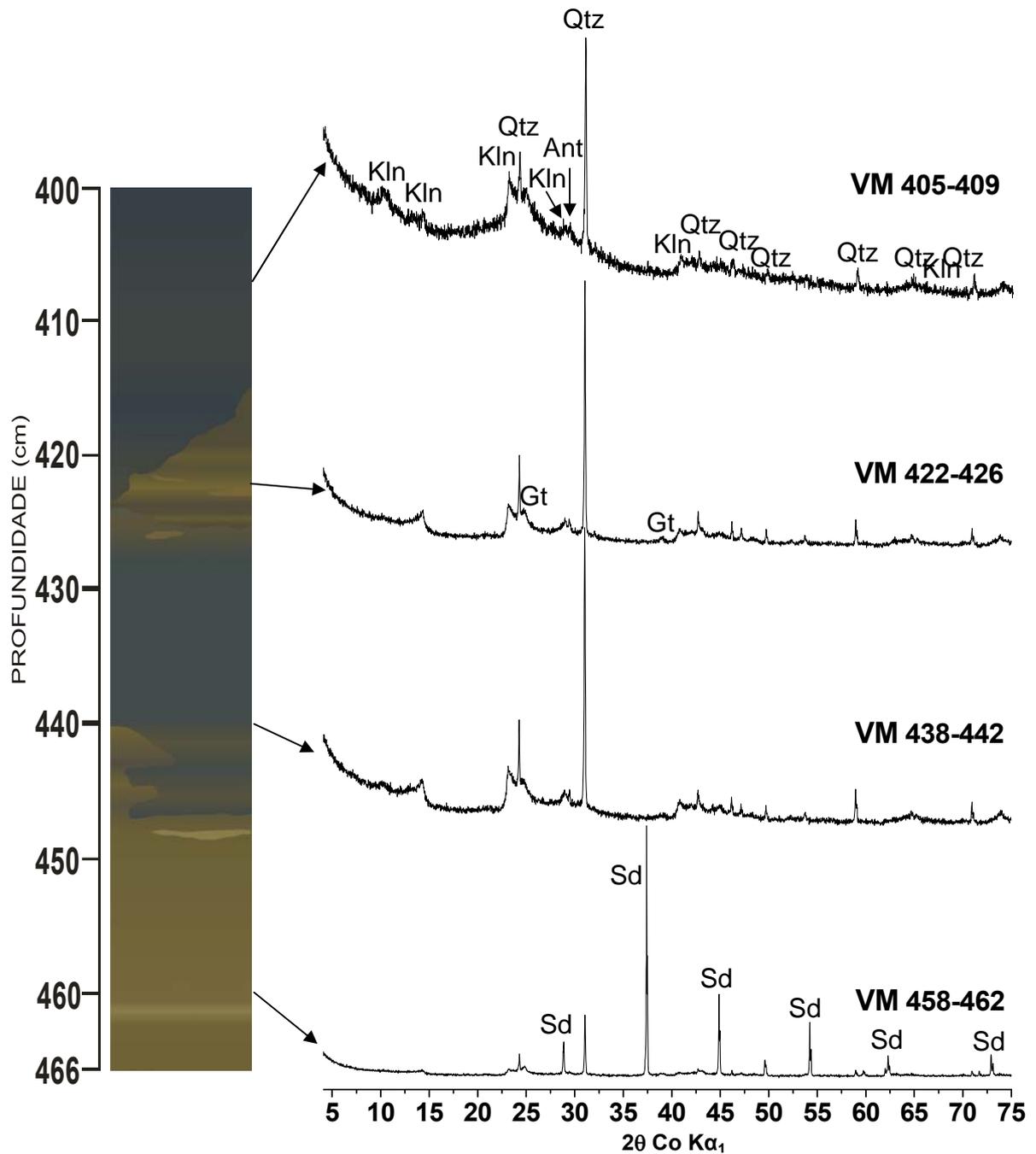
**Figura 37** – Constituição mineralógica do intervalo de 300-400 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Kln – caulinita; Ant – anatásio.



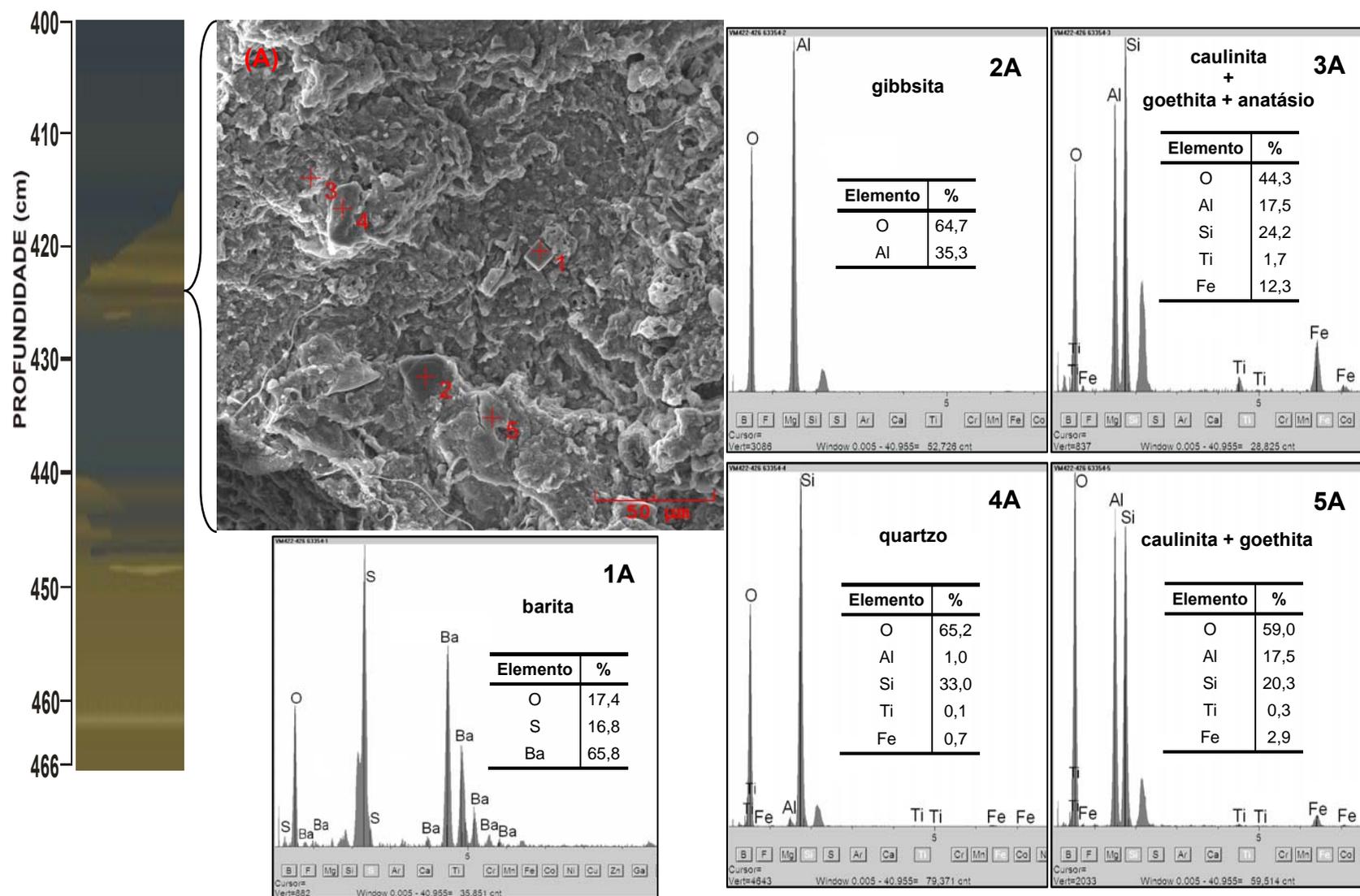
**Figura 38** - Imagem MEV da amostra VM 315-319, destacando um material predominantemente amorfo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado 1 e 2.



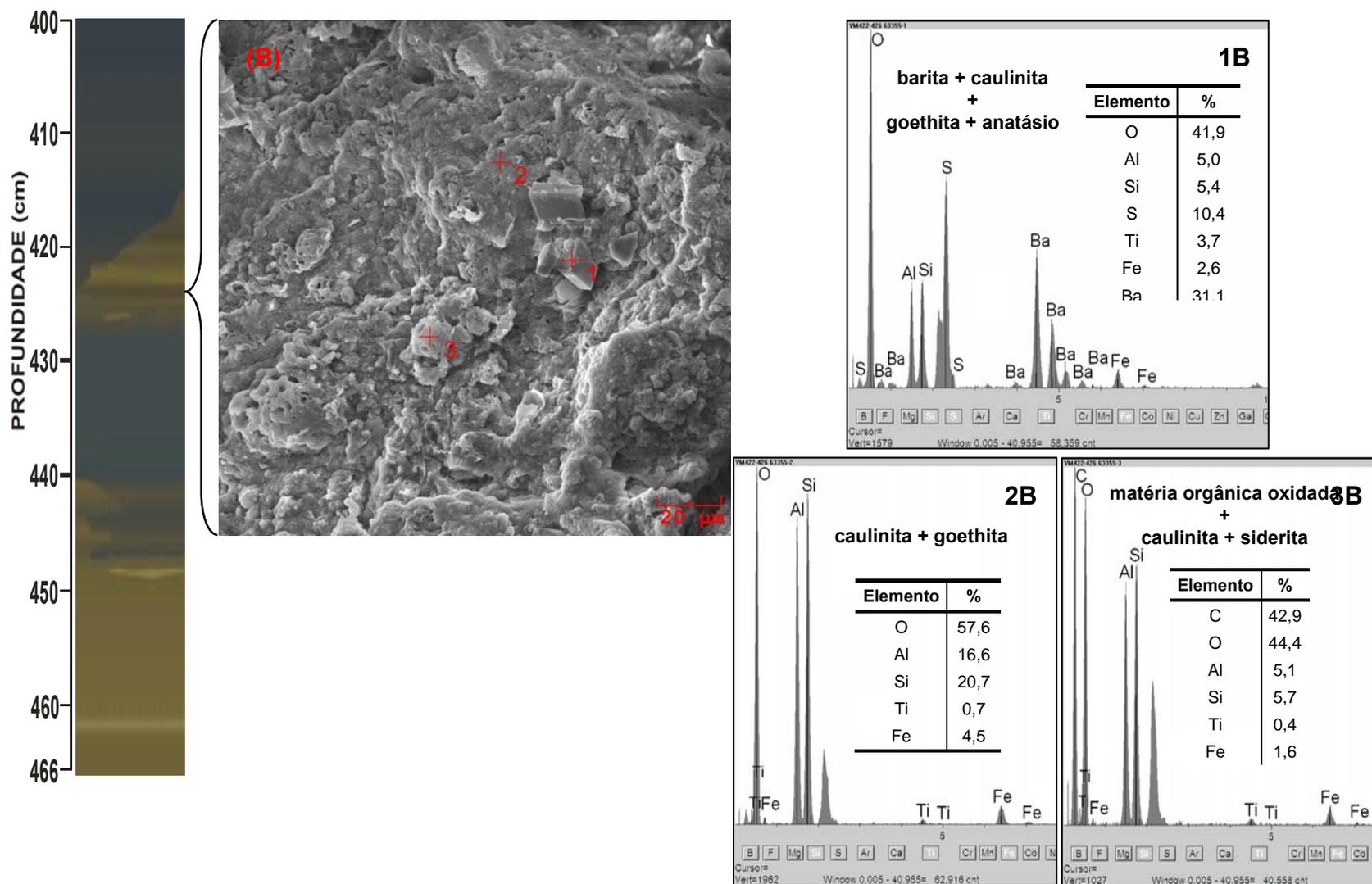
**Figura 39** - Imagem MEV da amostra VM 376-380, destacando um material predominantemente amorfo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado 1 e 2.  
Tr – traços.



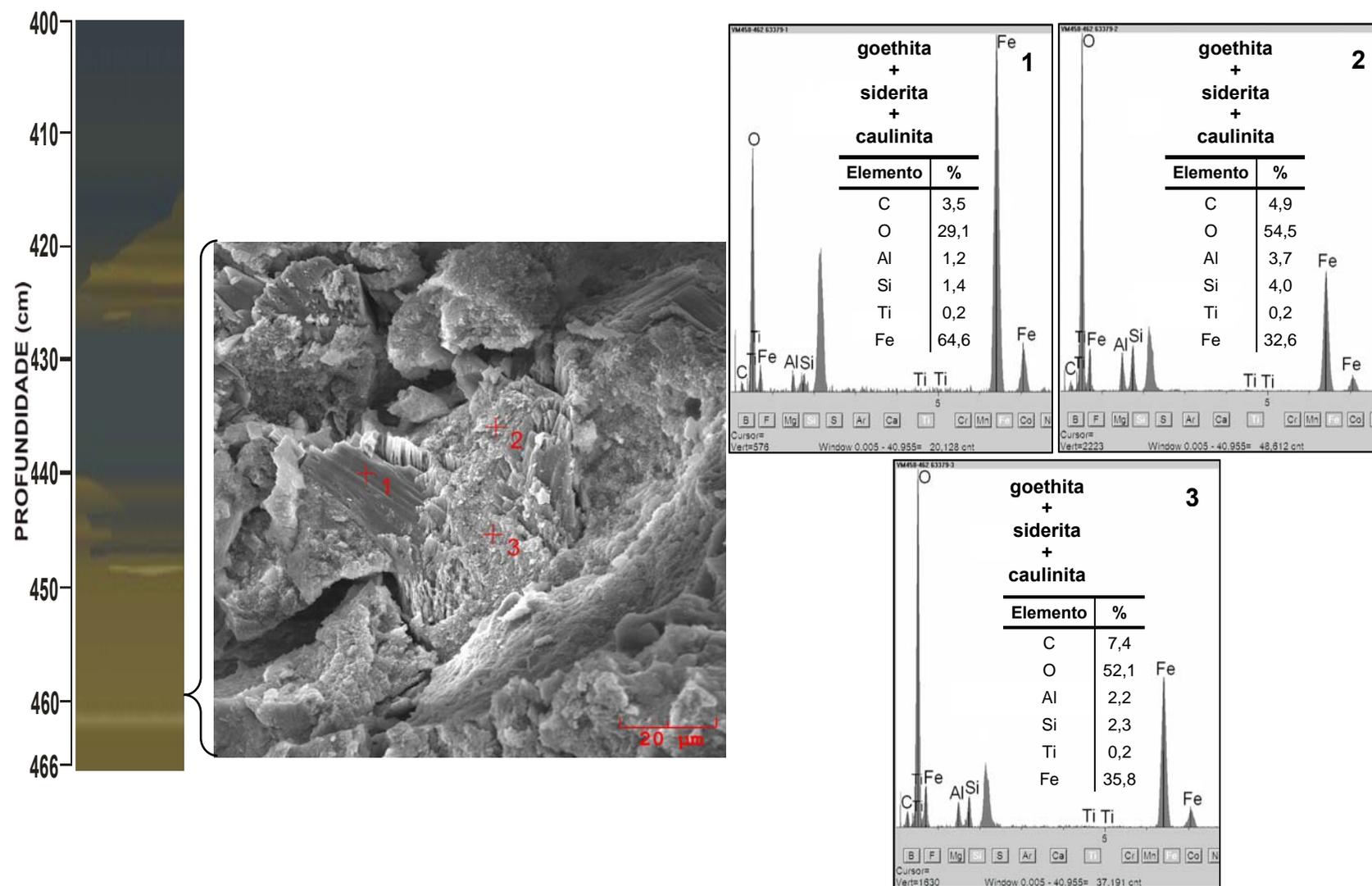
**Figura 40** – Constituição mineralógica do intervalo de 400-466 cm da sucessão sedimentar do pântano Mauritia. Qtz – quartzo; Gt – goethita; Kln - caulinita; Ant – anatásio; Sd – siderita.



**Figura 41** - Imagem MEV da amostra VM 422-426 (A), destacando um material heterogêneo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1A a 5A.



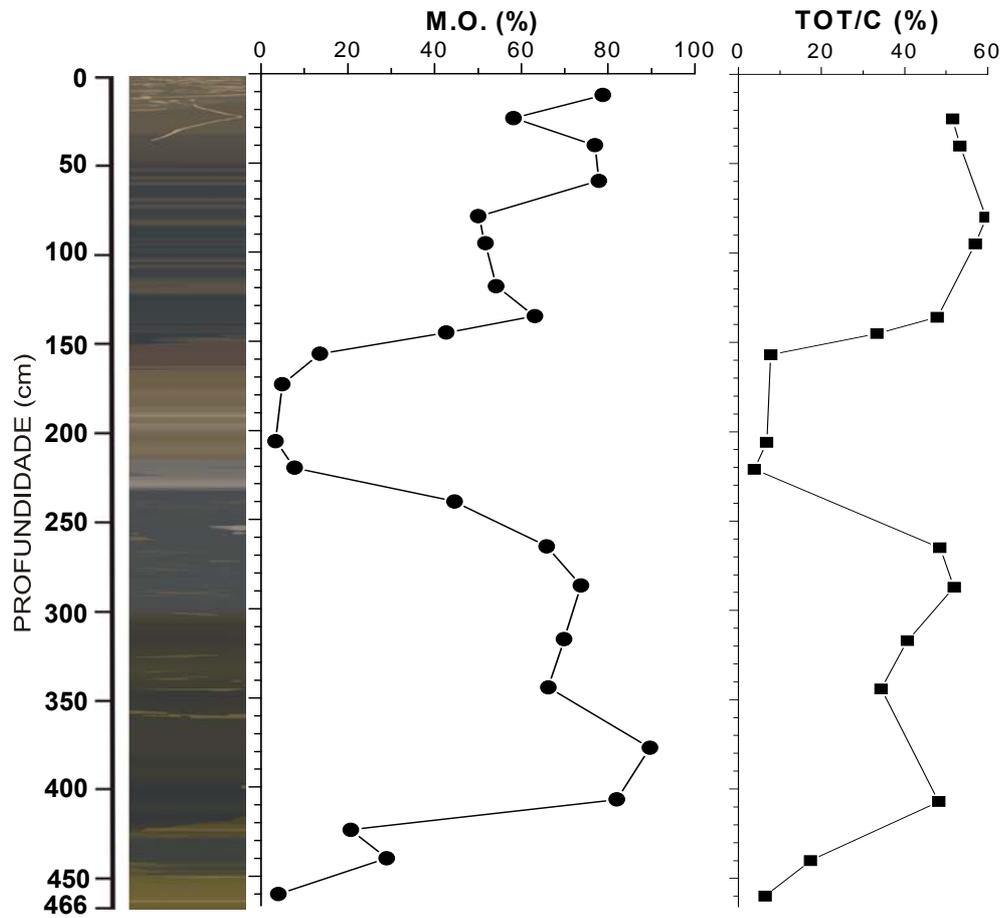
**Figura 42** - Imagem MEV da amostra VM 422-426 (B), destacando um material heterogêneo, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes a cada ponto analisado de 1B a 3B.



**Figura 43** - Imagem MEV da amostra VM 458-462, destacando um material microcristalino, associada aos espectros SED de micro-análises semiquantitativas correspondentes aos pontos analisados de 1 a 3.

### 3.5 MATÉRIA ORGÂNICA

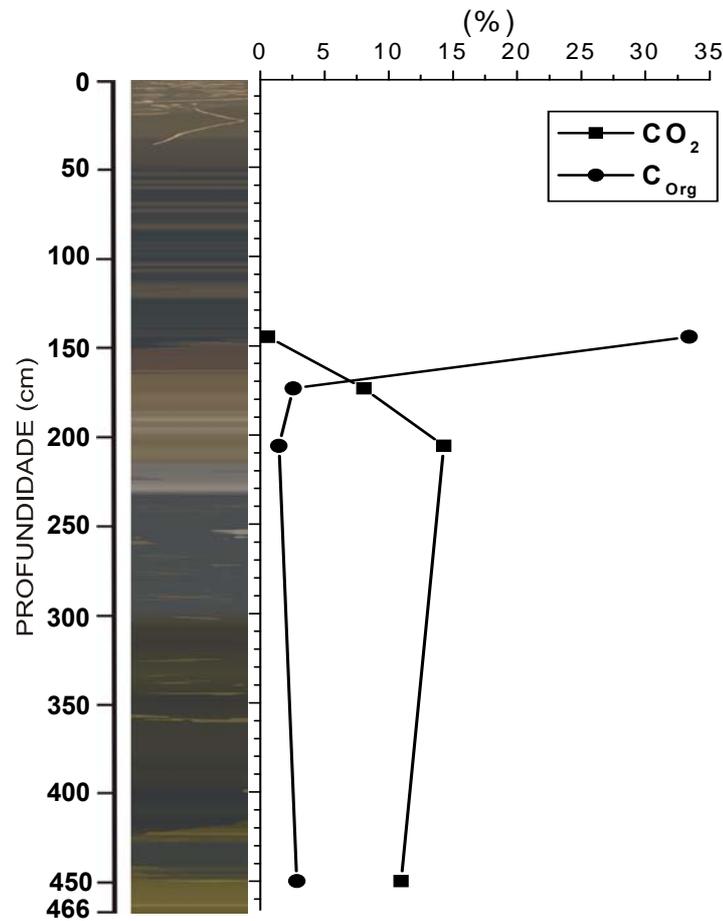
Além dos minerais e da matéria orgânica silicosa, os sedimentos do pântano Mauritia podem apresentar elevado conteúdo de matéria orgânica carbonosa. Os teores variam de 3,39 a 89,6% com média de 49,08%. Os baixos teores (< 5%) correspondem às duas camadas marrons, ricas em siderita. Estes teores aumentam de forma acentuada em direção as camadas de transição e alcançam altos teores em torno de 50-90%, nas camadas escuras, intervalos de ocorrência de substâncias húmicas (Figura 44). Correlacionam também com maior domínio de substâncias silicosas, caulinita e estão expressos nos espectros de DRX pela barriga larga de 4,0 a 4,3 Å. Os elevados teores de carbono são demonstrados também pelas análises pontuais obtidas por MEV/SED. Essas análises mostram ainda que a MO carbonosa encontra-se parcialmente oxidada nas camadas marrons, tendo sido em parte fonte para a formação da siderita (Tabela 4, Figura 45). A distribuição da MO carbonosa ao longo da sequência sedimentar do pântano Mauritia, como já sugeriam as descrições geológicas, indica domínio de duas condições ambientais cíclicas e alternadas de acúmulo e ausência de MO: fase inicial pobre em MO e rica em goethita + siderita, seguida por uma espessa e muito rica em MO, pobres nestes minerais; retomada das condições iniciais pobres em MO e rica em goethita + siderita, relativamente mais espessa; e finalmente retomada das condições do acúmulo de muita MO, mas desprovida ou muito pobre em minerais, os quais praticamente desaparecem para o topo da camada.



**Figura 44** – Distribuição da matéria orgânica ao longo do perfil do pântano Mauritia em comparação com os teores obtidos na análise de carbono total (AcmeLabs). TOT/C: carbono total.

**Tabela 4** – Conteúdo de CO<sub>2</sub> e C<sub>Org</sub> em amostras de sedimentos do pântano Mauritia.

Amostras	%	
	CO <sub>2</sub>	C <sub>Org</sub>
VM 143-147	0,55	33,38
VM 172-176	8,07	2,57
VM 204-208	14,3	1,45
VM 458-462	10,95	2,86



**Figura 45** – Distribuição dos teores de CO<sub>2</sub> e C<sub>Org</sub> no perfil dos sedimentos do pântano Mauritia.

### 3.5.1 Caracterização da MO carbonosa por FTIR

A matéria orgânica presente nos solos, turfas e sedimentos é constituída por uma mistura de compostos, em vários estágios de decomposição (Rocha & Rosa 2003, Kokonova 1966), envolvendo substâncias não húmicas e substâncias húmicas (Stevenson F.J. 1982, Aiken *et al.* 1985).

As substâncias não húmicas compreendem a celulose, polissacarídeos, carboidratos, proteínas, peptídeos, aminoácidos, gorduras, graxas e ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Tan 1982, Souza 1987). Enquanto que as substâncias húmicas são compostas por uma mistura homogênia de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas (Rocha & Rosa 2003), de coloração escura e alto peso molecular, resultantes da degradação química e biológica dos resíduos de

vegetais e animais pela atividade de síntese por microorganismos existentes nestes ambientes naturais (Tan 1982, Souza 1987).

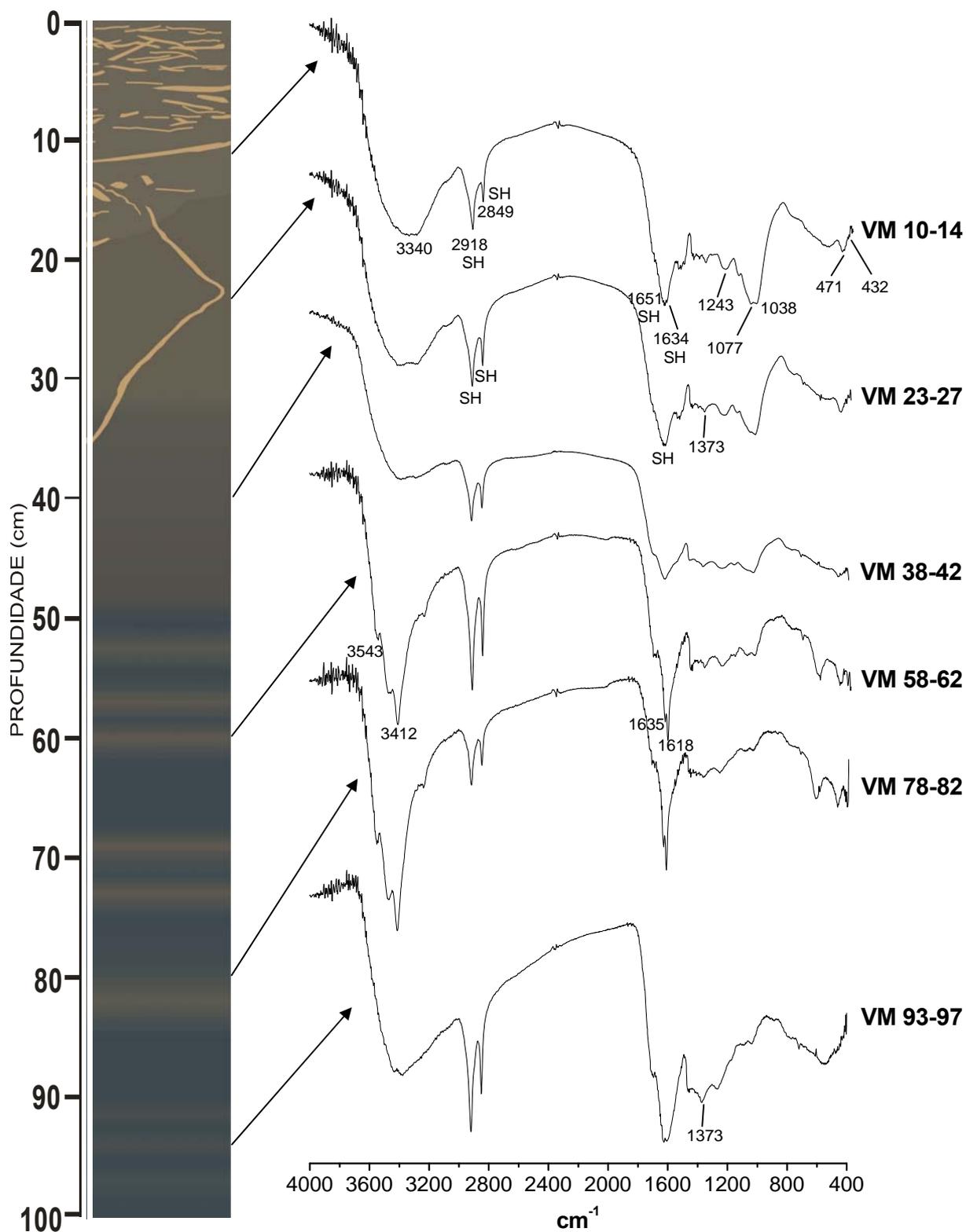
O perfil do pântano Mauritia foi caracterizado por espectroscopia de infravermelho onde identificou-se a presença de substâncias húmicas e minerais já identificados por DRX e MEV/SED.

As bandas de absorção características das frações húmicas aparecem no espectro, exclusivamente, na região de 4000 a 700  $\text{cm}^{-1}$ . Na região 3400  $\text{cm}^{-1}$  a banda de absorção é atribuída a vibrações de OH. Bandas de absorção na região de 3000-1600  $\text{cm}^{-1}$  são referentes a vibrações das ligações entre carbono e hidrogênio (C—H) ou oxigênio e hidrogênio (O—H). Na região de 1800-1600  $\text{cm}^{-1}$ , são bandas de absorção referentes a vibrações de ligações duplas entre carbono e oxigênio (C=O carbonil) e grupos carboxil (COO<sup>-</sup>). As bandas a 1416  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídas às vibrações de CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>.

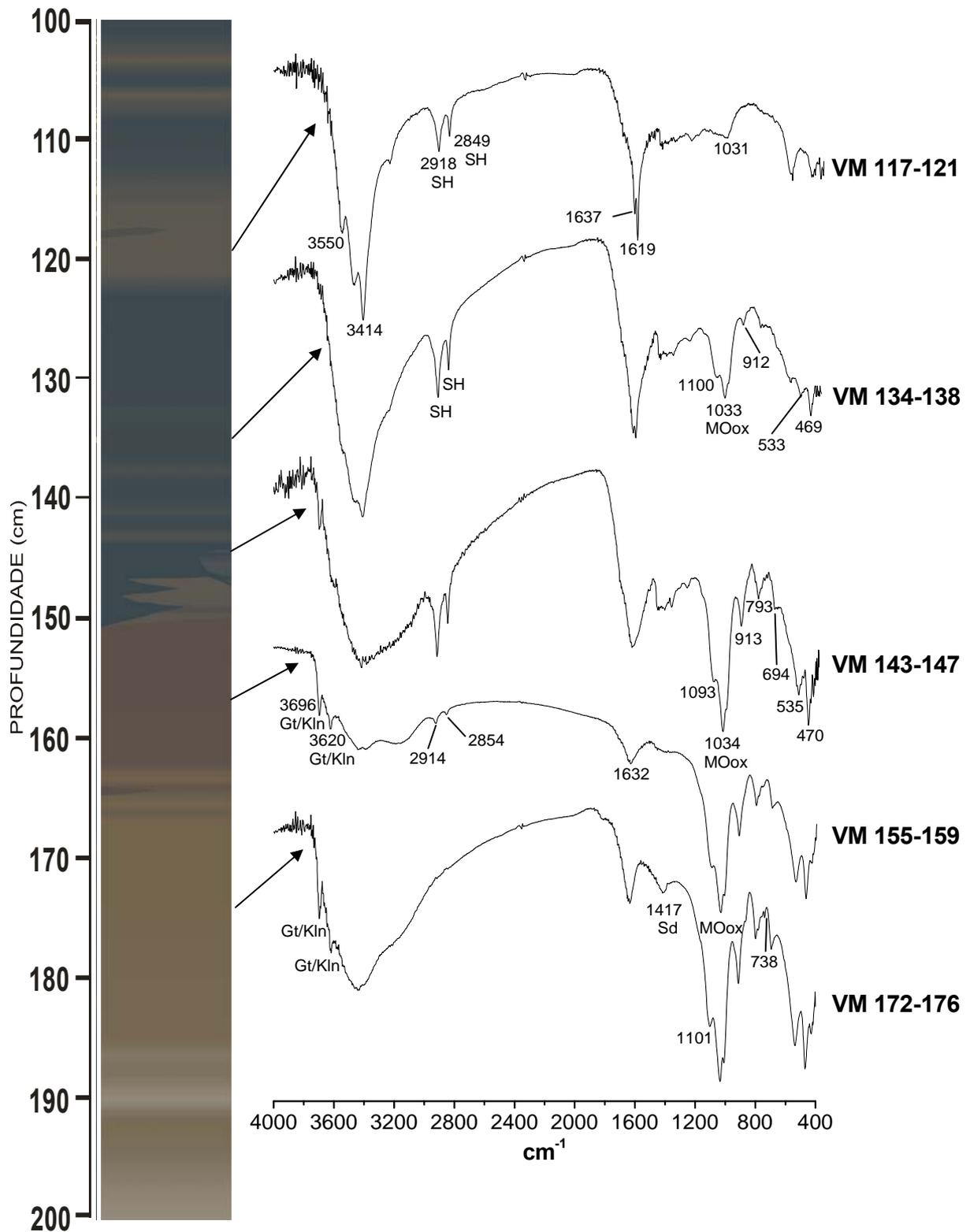
As bandas 2918-2849  $\text{cm}^{-1}$  e 1649-1634  $\text{cm}^{-1}$  referentes, respectivamente, às vibrações de C—H e O—H, estão bem desenvolvidas. São bandas características das substâncias húmicas demonstrando que estas estão presentes nos sedimentos do perfil pântano Mauritia, principalmente, nas camadas CEI, CES e CDO (Figuras 46 a 50). Estes intervalos são compostos por sedimentos que variam de cinza, marrom-acinzentado a marrom-escuro, coloração característica das frações húmicas. Os espectros de IV permitem acompanhar a variação transicional entre as camadas.

A banda 1034  $\text{cm}^{-1}$  é intensa nos espectros das camadas mais profundas, desde a base até 130 cm de profundidade, correspondendo ao domínio de MO oxidada, ou seja, carbono associado com oxigênio, conforme as análises de MEV-SED (Figuras 47 a 50). Sua intensidade diminui da base para o topo da sequência e está ausente no domínio húmico. As bandas a 3696 e 3620  $\text{cm}^{-1}$  presentes nitidamente nas amostras das camadas marrons representam OH<sup>-</sup> das goethitas e caulinitas. Elas são menos nítidas em bandas delgadas marrons na camada cinza escura inferior.

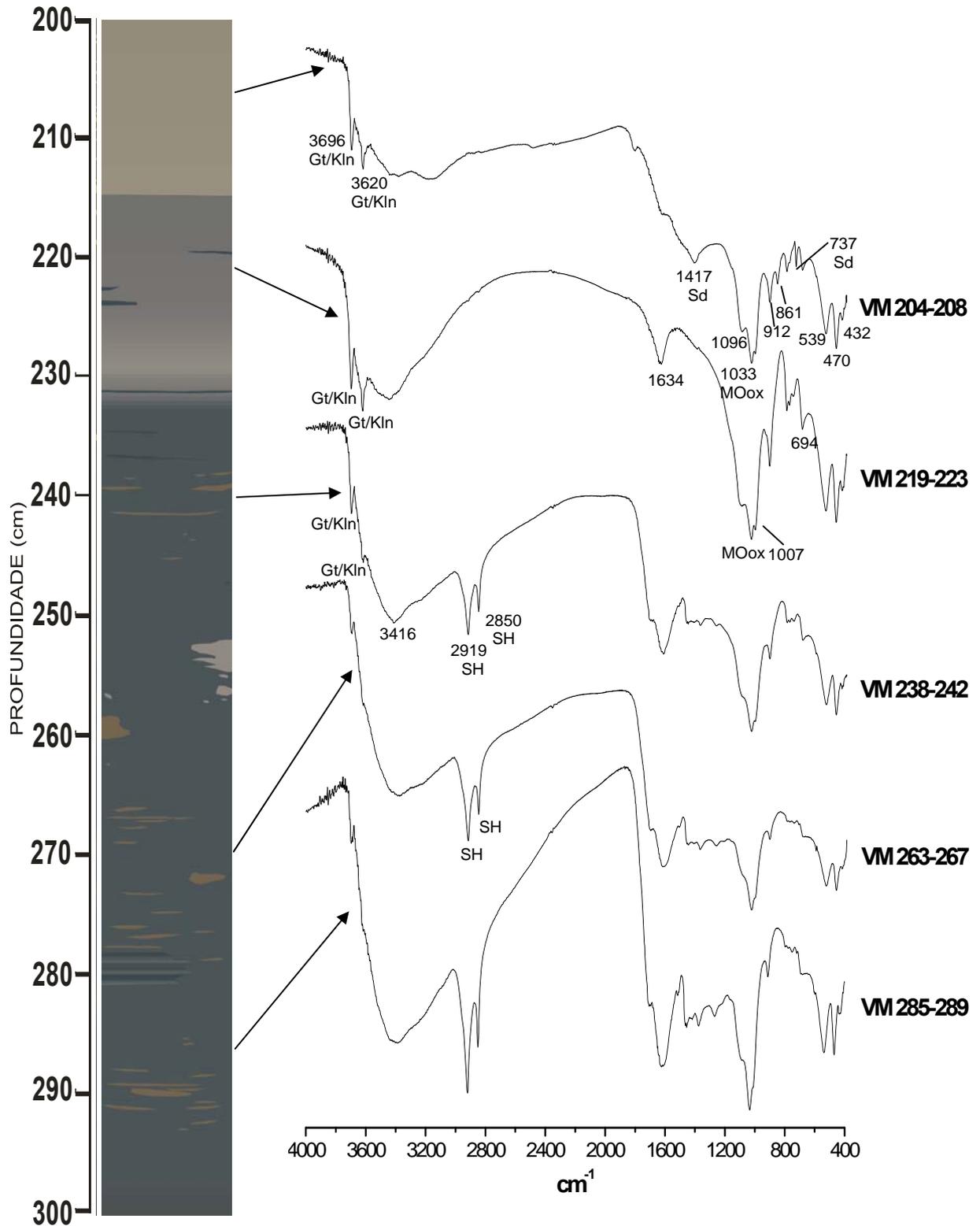
As bandas de absorção para os argilominerais em geral, situam-se no espectro na região entre 4000 e 3000  $\text{cm}^{-1}$  atribuída à vibração de estiramento da água e/ou grupos octaédricos OH e as vibrações atribuídas a Al-OH e/ou Si-O estão na região entre 1400 e 800  $\text{cm}^{-1}$ , chamada região fundamental do espectro (Tan 1982). No caso da siderita, as frequências de absorção características, em ordem de intensidade, são 1800, 1620, 1417, 868 e 737  $\text{cm}^{-1}$  (Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures 1976).



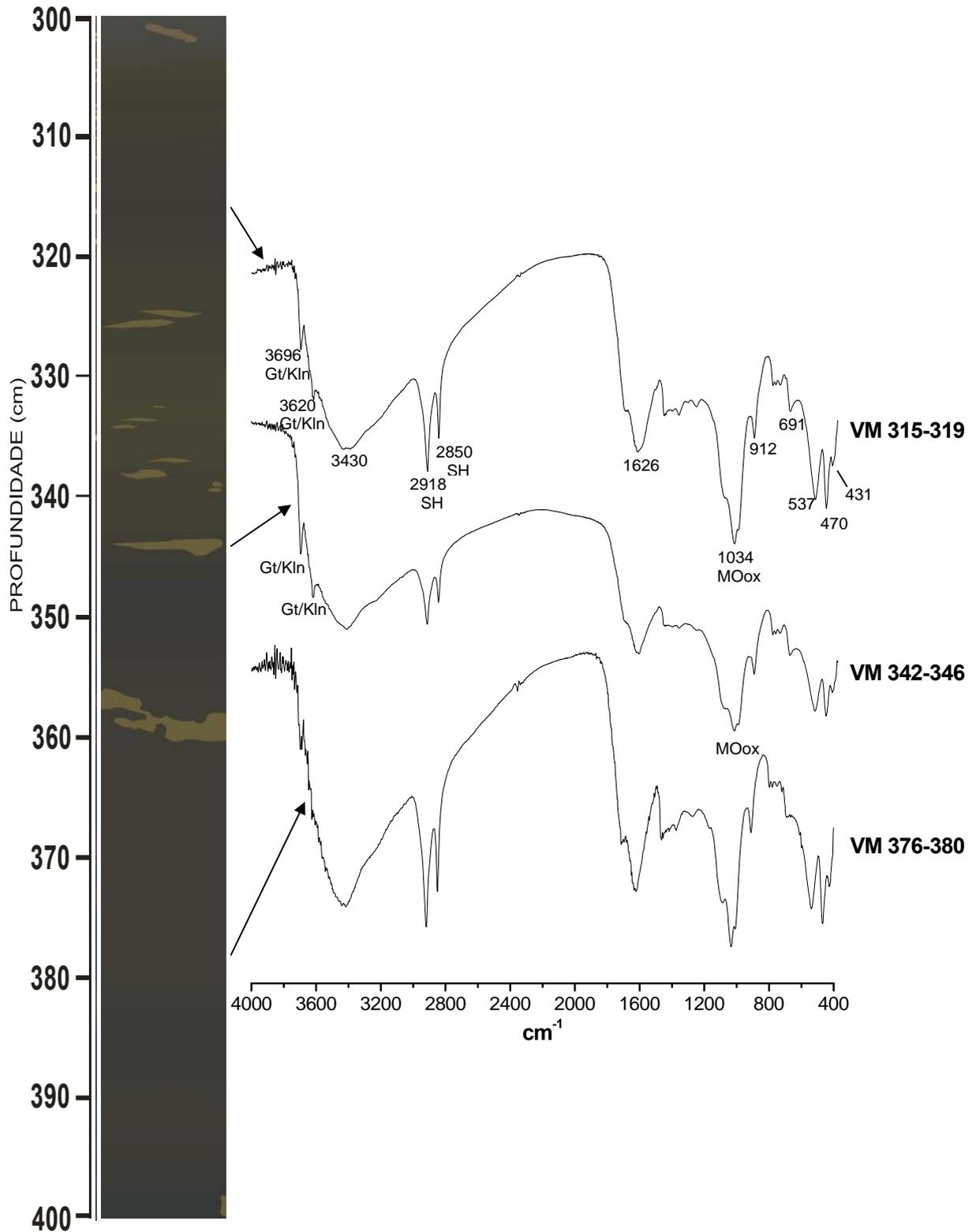
**Figura 46** – Espectros de IV destacando na região 4000-700  $\text{cm}^{-1}$  bandas características das frações húmicas correspondente a camada sedimentar mais recente (100 cm). SH – substâncias húmicas.



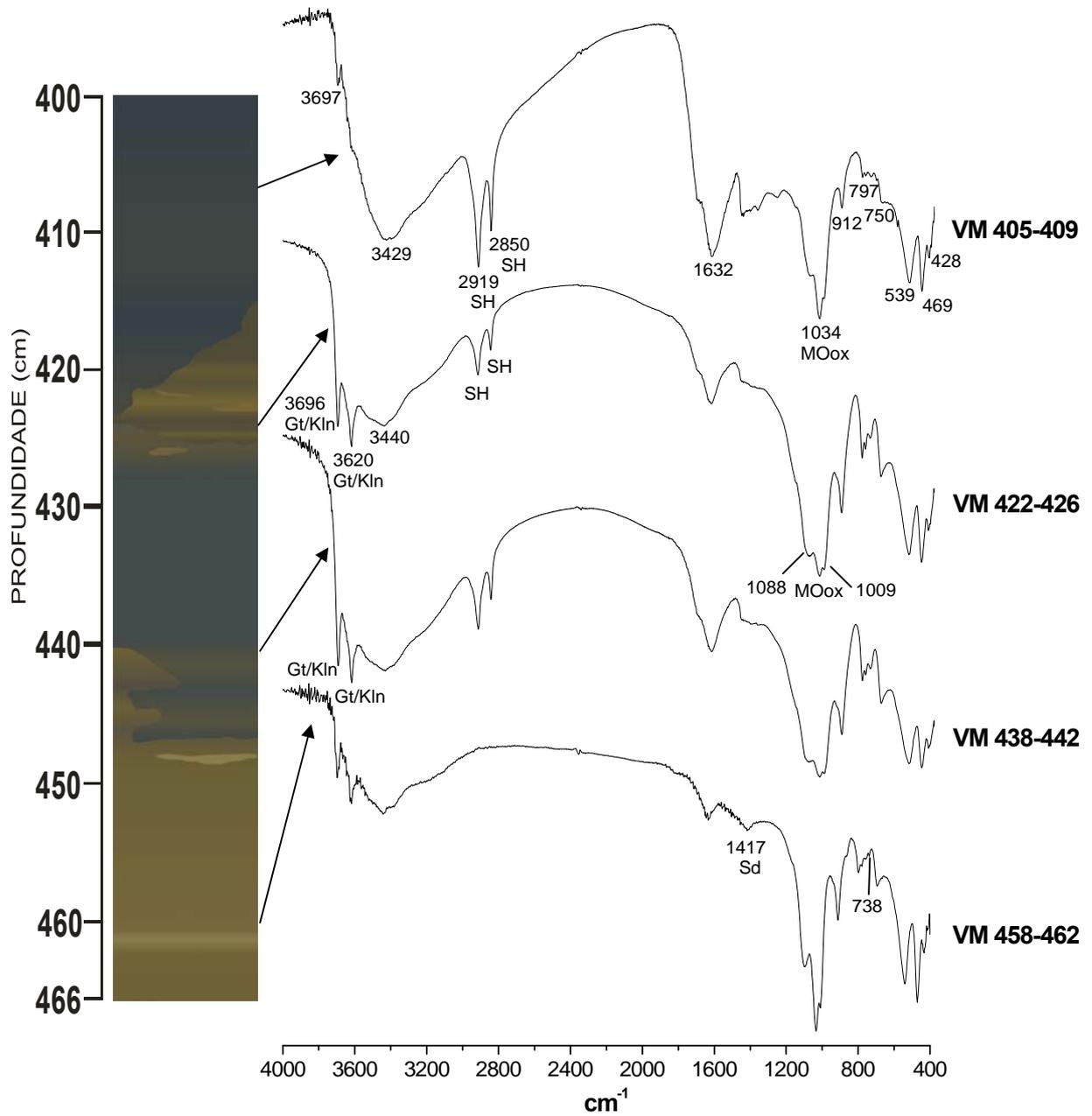
**Figura 47** – Espectros de IV destacando um intervalo de transição (150-165 cm) entre uma camada rica em matéria orgânica e outra de domínio dos minerais. Banda a  $1417 \text{ cm}^{-1}$  sugere a presença de siderita. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln – goethita; Sd - siderita.



**Figura 48** – Espectros de IV destacando a presença das frações húmicas a partir da profundidade de 230 cm. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln – goethita; Sd - .siderita.



**Figura 49** – Espectros de IV destacando o intervalo 300-400 cm com predominância das frações húmicas. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln - goethita.



**Figura 50** – Espectros de IV destacando um intervalo rico em frações húmicas (400-447 cm) seguida da base aparente do perfil onde estas estão degradadas (447-466 cm). Banda a  $1417\text{ cm}^{-1}$  pode ser correlacionada a presença de siderita. SH – substâncias húmicas; MOox – matéria orgânica oxidada; Gt/Kln – goethita; Sd - siderita.

## 3.6 GEOQUÍMICA

### 3.6.1 Composição química e quimioestratigrafia

Os sedimentos do pântano Mauritia são constituídos principalmente de carbono orgânico, representado pelos altíssimos valores de PF, que são correspondidos pelos valores de matéria orgânica, variando enormemente de 3,39 a 89,6% com média de 49,08%. Ou seja, em média quase 50 % dos sedimentos são constituídos de matéria orgânica carbonosa. A fração restante está representada por  $\text{SiO}_2$  com extrema variação (1,7 a 43,56%) com média de 14,47%; por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  também com grande variação ao longo da sequência (1,17 a 51,95%) com média de 11,82%, e da mesma forma  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,74 a 21,17%), com média de 7,67 %. Os teores de  $\text{TiO}_2$  são muito mais baixos, mas também muito variáveis (0,03 a 2,36%), com média de 0,66% (Tabela 5). As grandes variações nos teores de  $\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  são, portanto, características intrínsecas dos sedimentos do pântano Mauritia, da mesma forma como a quase ausência de  $\text{K}_2\text{O}$  (0,01 a 0,28%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,01 a 0,21%),  $\text{MgO}$  (0,01 a 0,14%) e  $\text{CaO}$  (0,01 a 0,04) com médias, respectivas, de 0,09%; 0,08%; 0,05% e 0,2%; de  $\text{MnO}$  (0,01 a 0,03%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,01 a 0,02%) e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,002 a 0,019%) com médias iguais ou inferiores a 0,01%. Essa composição química dos sedimentos do pântano Mauritia não guarda qualquer semelhança com a composição de rochas crustais e muito menos com os folhelhos (Tabela 5, Figuras 51 e 52). Por sua vez excetuando a grande quantidade de  $\text{C}_{\text{org}}$ , as concentrações dos demais elementos químicos só encontram paralelo em formações de crostas lateríticas ferro-aluminosas (Figura 53). Os teores mais baixos aqui encontrados foram diluídos, portanto, pela grande concentração de MO. Mas a composição química do pântano Mauritia por sua vez é similar a composição química dos sedimentos da Lagoa Cachoeira, também na Serra Sul. A divergência se dá apenas nos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , muito mais altos na Lagoa (Tabela 5).

**Tabela 5** – Composição química dos sedimentos do pântano Mauritia comparada com as composições químicas do Lago Cachoeira, Média Crustal e Folhelhos.

Amostras	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MnO %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	TiO <sub>2</sub> %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	P.F. %	C <sub>tot</sub> %	S <sub>tot</sub> %
VM 23-27	4,59	0,74	1,17	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03	0,09	0,002	92	51,56	0,47
VM 38-42	5,12	1,03	1,74	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,04	0,05	0,002	90,5	53,29	0,42
VM 78-82	2,55	1,54	3,31	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,08	0,05	0,002	92,4	59,60	0,18
VM 93-97	1,7	1,43	3,53	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,07	0,04	0,002	93,5	57,01	0,2
VM 134-138	5,99	4,20	4,49	0,01	0,05	0,03	0,02	0,07	0,29	0,06	0,005	84,8	47,92	0,35
VM 143-147	11,58	7,2	15,4	0,01	0,05	0,03	0,01	0,07	0,56	0,1	0,008	64,8	33,27	0,34
VM 155-159	31,12	15,18	23,57	0,01	0,08	0,01	0,01	0,15	1,44	0,16	0,013	28	7,81	0,11
VM 204-208	14,27	6,86	51,95	0,03	0,01	0,01	0,01	0,08	0,83	0,15	0,006	25,7	6,79	0,15
VM 219-223	43,56	21,17	9,34	0,01	0,13	0,01	0,02	0,28	2,36	0,08	0,019	22,8	3,91	0,29
VM 263-267	8,00	4,29	4,74	0,01	0,02	0,02	0,01	0,06	0,35	0,03	0,005	82,5	48,45	0,71
VM 285-289	5,96	3,81	3,83	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,24	0,01	0,004	85,9	51,93	0,54
VM 315-319	16,65	8,86	4,49	0,01	0,05	0,01	0,02	0,13	0,73	0,03	0,008	68,9	40,58	0,39
VM 342-346	18,96	10,47	4,55	0,01	0,05	0,01	0,01	0,14	0,90	0,03	0,010	64,8	34,30	0,73
VM 405-409	8,80	5,81	4,69	0,01	0,04	0,01	0,01	0,06	0,48	0,03	0,006	80,0	48,16	0,99
VM 422-426	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	11,74	0,34
VM 438-442	33,26	19,78	8,94	0,01	0,14	0,02	0,01	0,19	1,23	0,13	0,016	36,1	17,28	0,43
VM 458-462	19,37	10,38	43,34	0,02	0,04	0,01	0,01	0,12	0,88	0,21	0,008	25,5	6,39	0,09
Média	14,47	7,67	11,82	0,01	0,05	0,02	0,01	0,09	0,66	0,08	0,01	64,89	34,12	0,40
Máximo	43,56	21,17	51,95	0,03	0,14	0,04	0,02	0,28	2,36	0,21	0,019	93,5	59,6	0,99
Mínimo	1,7	0,74	1,17	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,002	22,8	3,91	0,09
Média Lago Cachoeira	19,23	8,03	36,51	0,01	0,05	0,01	0,02	0,07	0,75	6,64	NA	33,77		
CTS	64,92	14,63	4,42	0,07	2,24	4,12	3,46	3,45	0,52	0,15	0,005			
Folhelhos	58,4	15,12	6,75	0,11	2,49	3,09	1,29	3,2	0,77	0,16	0,01			

CTS – crosta terrestre superior (Wedepohl, 1995).

Folhelhos (Turekian & Wedepohl, 1961).

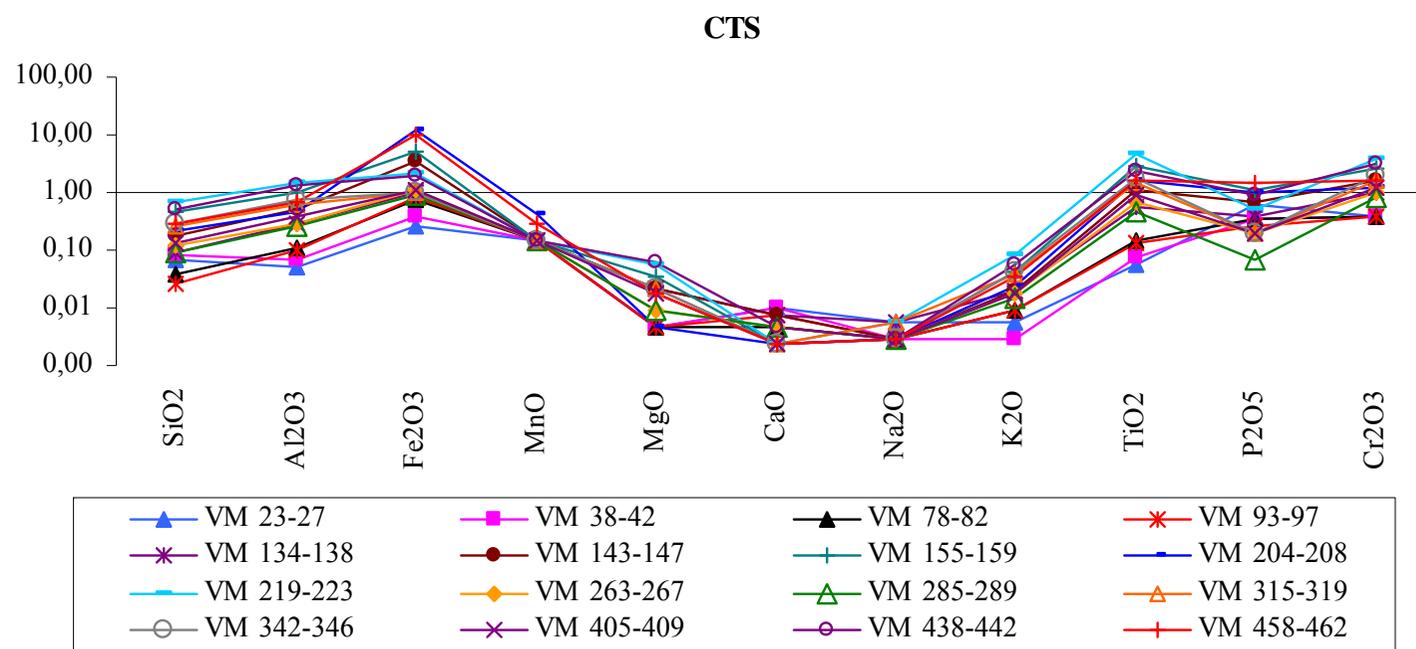
P.F. - Perda ao fogo.

C<sub>tot</sub> – carbono total.

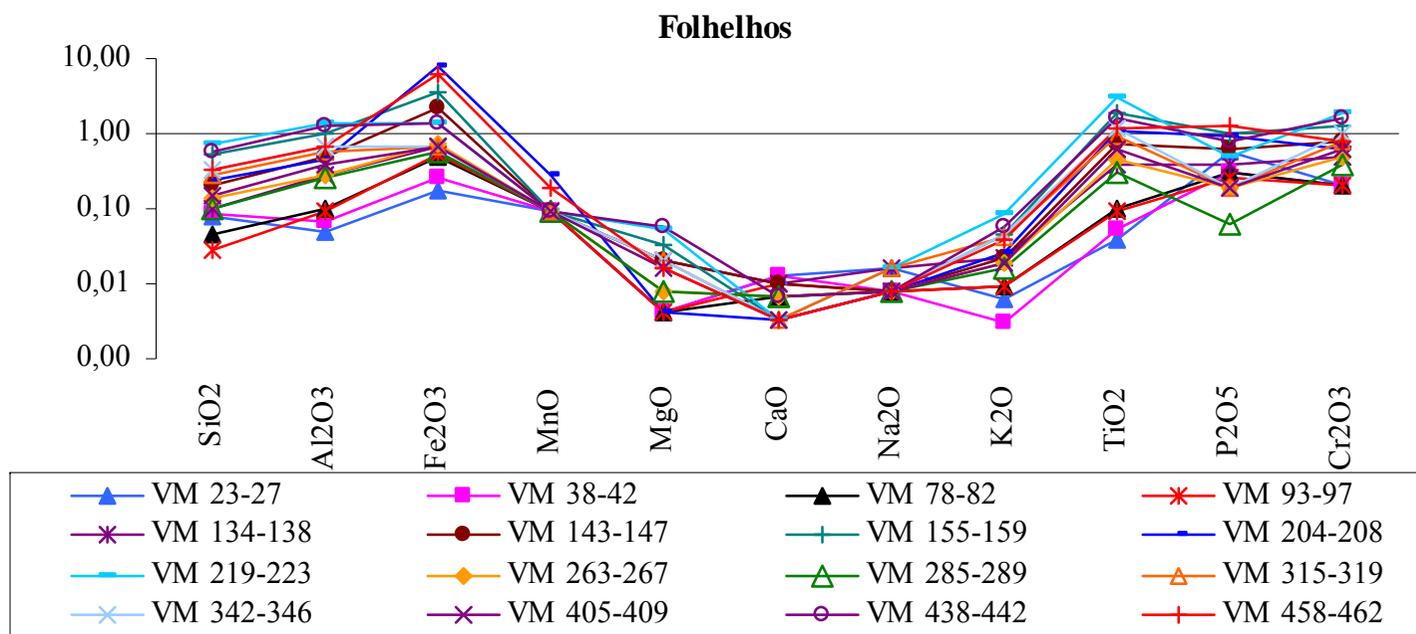
S<sub>tot</sub> – enxofre total.

N.D. – não detectado.

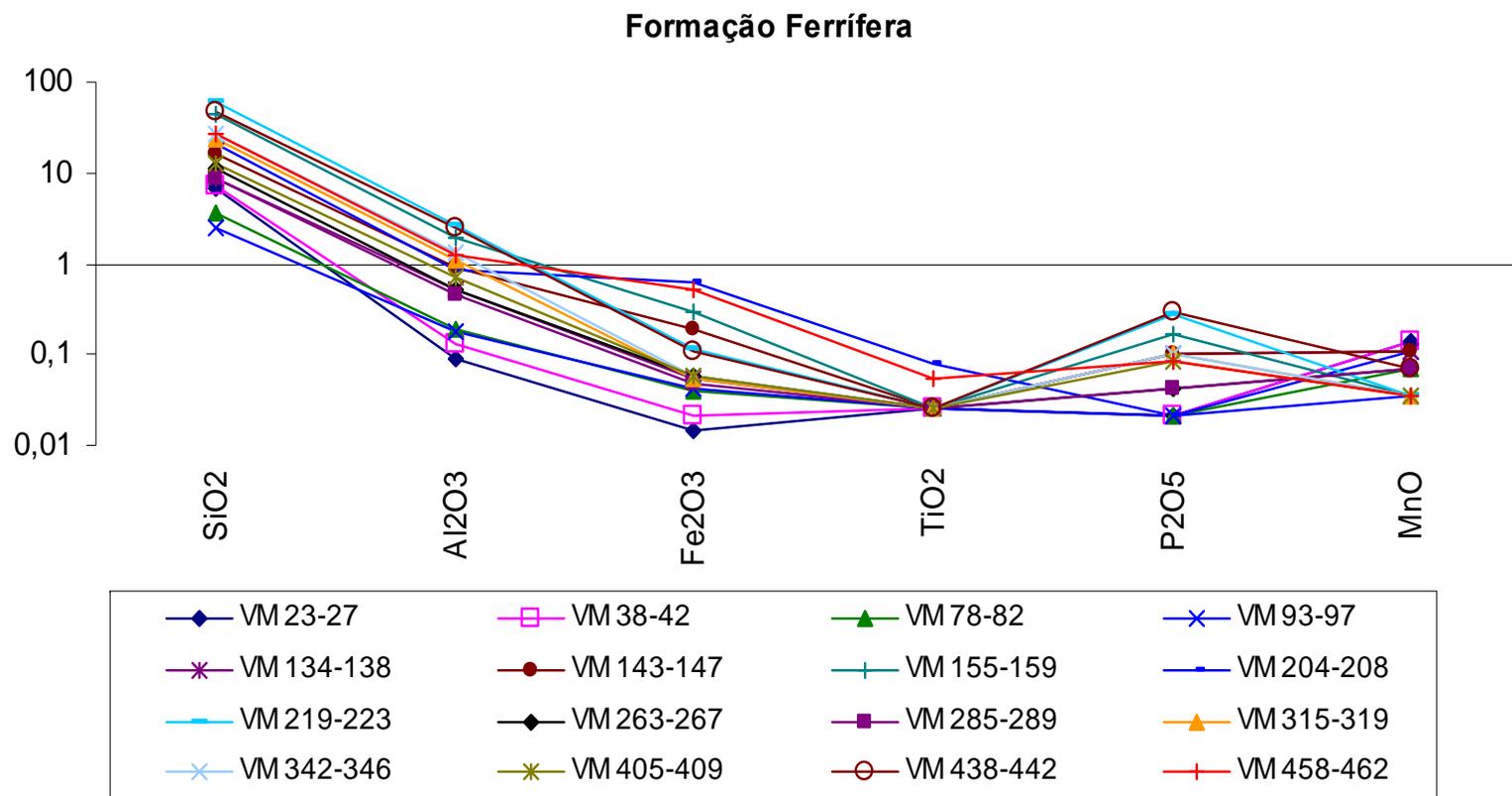
N.A. – não analisado.



**Figura 51** – Normalização dos elementos maiores e menores contra a média da crosta terrestre superior (Wedepohl 1995).



**Figura 52** – Normalização dos elementos maiores e menores contra folhelhos (Turekian & Wedepohl 1961).



**Figura 53** – Normalização dos elementos maiores e menores contra Formação Ferrífera (Soubiés *et al.* 1991).

Os valores mais altos de MO, como é de se esperar, encontram-se nas camadas escuras, CEI e CES, praticamente em igual quantidade, variando de 42,7 a 89,6%, que em termos de  $C_{total}$  oscilam entre 34,3 e 59,6%; e mais baixos nas camadas marrons, CMI e CMS (Tabela 6). Além disso, as cinco camadas caracterizadas com base nos aspectos geológicos, tamanho das partículas e sua frequência bem como composição mineralógica, também se deixam distinguir pela distribuição dos teores dos principais constituintes químicos:  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$ . As camadas marrons (CMI e CMS) se destacam pelas concentrações mais elevadas de  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$ , além de  $P_2O_5$ , mesmo que em concentrações muito baixas. Enquanto as camadas escuras (CEI e CES + CDO) pelas concentrações mais baixas destes componentes, porém mais altas de S e claro MO (Tabela 6, Figura 54). Não foram identificados minerais de enxofre, como sulfetos, que preferencialmente se associam com camadas redutoras, acumuladoras de detritos vegetais. Portanto estas características químicas das camadas escuras confirmam a condição de grande domínio de desenvolvimento e acúmulo de MO orgânica vegetal durante a sua formação, com pouco aporte de material detrítico inorgânico das crostas lateríticas, e as camadas marrons como de amplo domínio de aporte de material detrítico das crostas lateríticas, entretanto com o desenvolvimento de material orgânico silicosos, como atestam os altos teores de  $SiO_2$  nas camadas marrons, que não teria uma origem tão somente nas crostas lateríticas. A CMS contém ainda relictos destes organismos silicosos. Um fato importante é que os teores de  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$ , também  $K_2O$  e  $Cr_2O_3$ , em termos gerais decrescem em direção ao topo da sequência. Admitindo-se que as camadas CES e CDO sejam um novo ciclo equivalente a CEI, a diminuição de teores pode ser explicada pelo fato de que grande parte da matéria orgânica carbonosa ainda não experimentou sensível mineralização e oxidação, não permitindo a concentração relativa destes componentes nas camadas escuras superiores.

A distribuição dos teores dos elementos maiores principais  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  além de PF (representada principalmente pela MO) descreve claramente as camadas marrons e escuras.  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$  mostram forte paralelismo entre si e seus valores mais altos discriminam as camadas marrons, da mesma forma que  $Fe_2O_3$ , e são antagônicos com PF, ou seja, com o domínio da MO (Figura 54). Este padrão permite identificar a alternância entre camada marrom e escura, a transição entre elas e ainda as intercalações em cada camada. Os teores de  $SiO_2$  tendem a aumentar na camada superior CDO. Estes aspectos são ilustrados de forma clara nos diagramas ternários, principalmente nos diagramas  $Fe_2O_3$  ou  $Al_2O_3$  ou  $SiO_2$  com

$C_{tot}$  e  $S_{tot}$  e  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ -PF (Figuras 55 e 56). Neste último as amostras descrevem uma função linear, que converge para as camadas ricas em MO e para as mais jovens, e ainda discrimina nitidamente as camadas marrons das escuras, preservando a interdependência química laterítica reforçada pelo comportamento linear; definido pela equação:

$$f = 100 - \{(82,5 - x) + (23,75 - y) + (93,75 - z)\}. \quad (1)$$

Onde, Si = x, Al = y, PF = z.

No diagrama  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $Fe_2O_3$  (Figura 56) também se observa um comportamento linear, mas sem distinção das camadas, indicando que estes elementos em grande provieram dos minerais lateríticos, em que as duas amostras de topo se destacam pelo domínio de  $SiO_2$ , retratando a presença de compostos orgânicos silicosos, como cauixi e gramíneas.

**Tabela 6** – Teores de carbono total ( $C_{tot}$ ) e enxofre total ( $S_{tot}$ ).

Amostras	Camadas	$C_{tot}$ (%)	$S_{tot}$ (%)
		LDM (0,02)	LDM (0,02)
VM 78-82	CES	59,6	0,18
VM 134-138	CES	47,92	0,35
VM 204-208	CMS	6,79	0,15
VM 263-267	CEI	48,45	0,71
VM 342-346	CEI	34,30	0,73
VM 405-409	CEI	48,16	0,99
VM 458-462	CMI	6,39	0,09

LDM - limite de detecção médio em % peso.

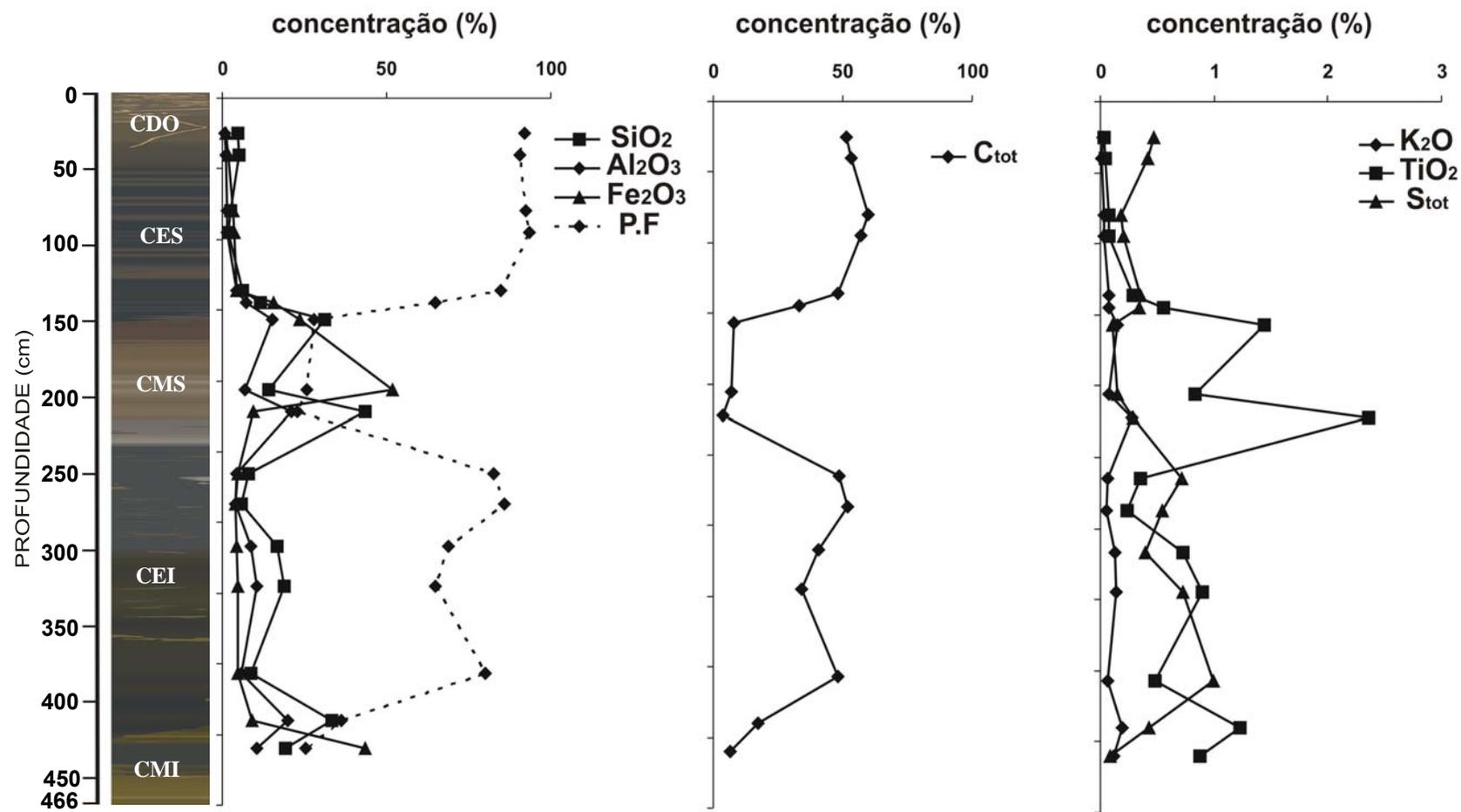
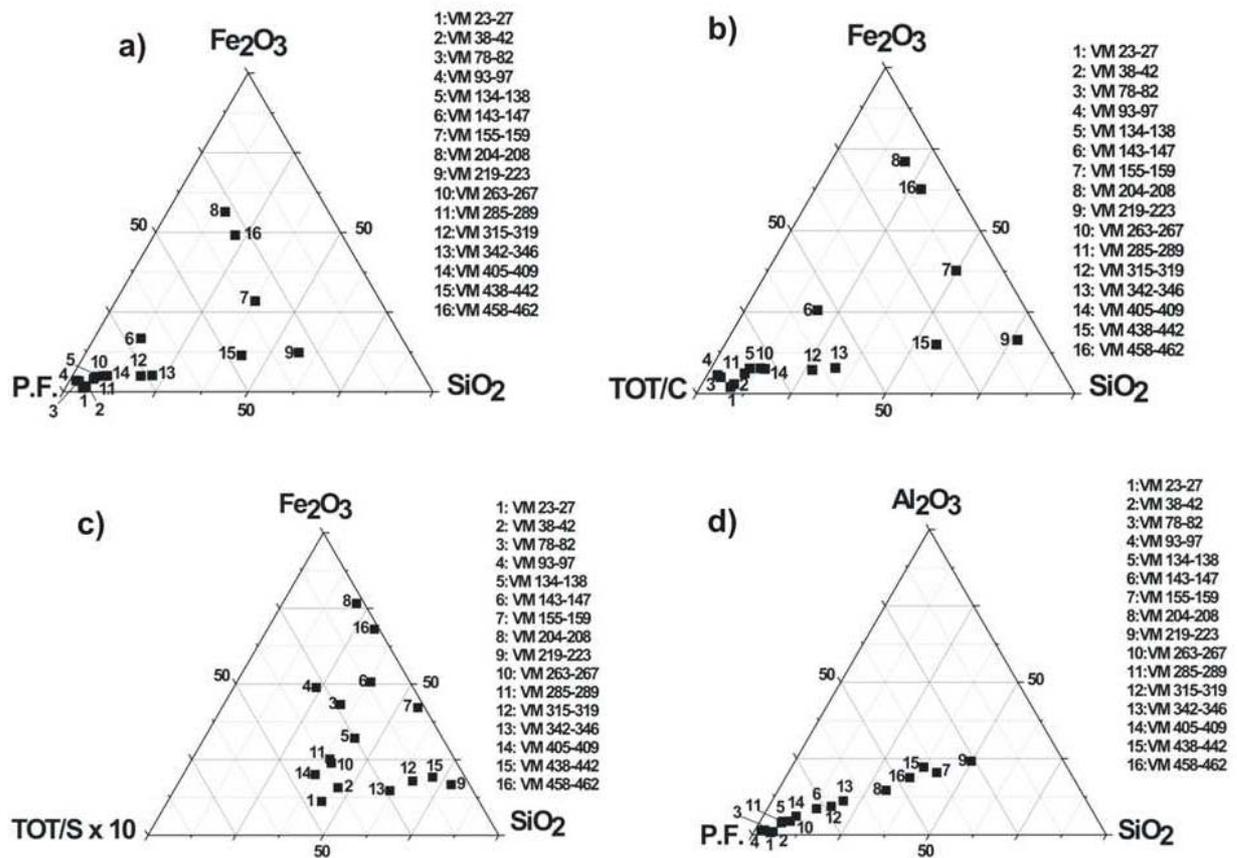
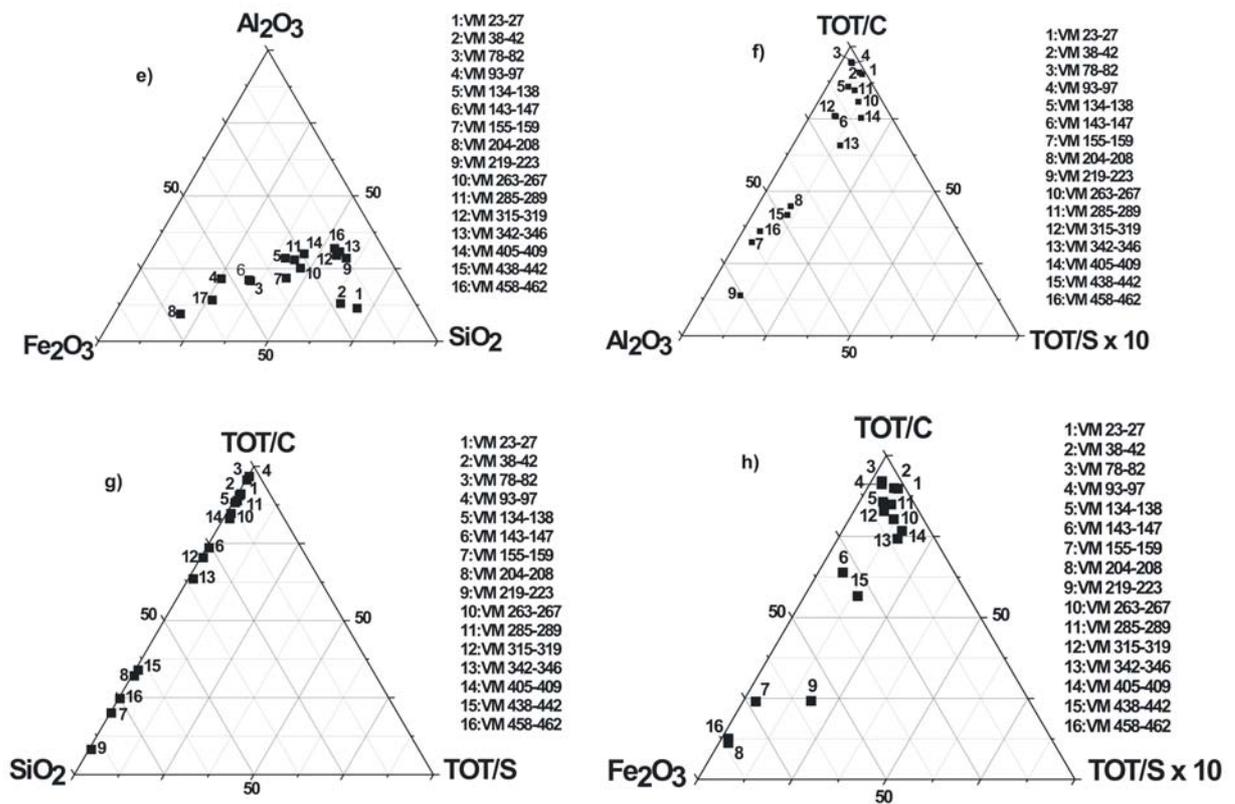


Figura 54 – Distribuição dos óxidos dos elementos maiores, PF, C<sub>tot</sub> e S<sub>tot</sub> na seqüência do pântano Mauritia (Quimioestratigrafia).



**Figura 55** - Diagramas químicos ternários para os sedimentos do pântano Mauritia, ressaltando as diferenças químicas entre as camadas, em termos de proporções dos elementos principais, em que a herança laterítica é muito forte e recebeu grande contribuição de material orgânico vegetal carbonoso, silicoso e ainda sulfídrico/sulfato.



**Figura 56** - Diagramas químicos ternários para os sedimentos do pântano Mauritia, ressaltando as diferenças químicas entre as camadas, em termos de proporções dos elementos principais, em que a herança laterítica é muito forte e recebeu grande contribuição de material orgânico vegetal carbonoso, silicoso e ainda sulfuroso.

### 3.6.2 Elementos-traços e quimioestratigrafia

Entre os elementos-traços analisados nos sedimentos do pântano Mauritia vários se encontram em concentrações abaixo do limite de detecção (LD), que já é muito baixo (Mn, Be, Ag, Tl, Au e Sb) e muitos outros ainda estão abaixo do LD na camadas superiores CES e CDO (Cr, Sc, Co, Cs, Sn, Ta, U, W, As, Cd e Bi). Os demais elementos-traços apresentam-se em níveis muito inferior (Mn, Be, Ba, Sr, Rb, Co, Cs, Mo, Zn e Sb), inferior (Nb, Zr, Y, Pb, Ni, As e ETR La-Dy), outros equivalentes aqueles da Crosta Terrestre (Sc, Ga, Hf, Sn, Ta, Th, U e Cd), e poucos acima (V, W, Cu e ETR Ho-Lu ) e apenas Hg e Se muito acima. Quando comparados com os folhelhos PAAS o quadro persiste, aqueles com teores muito inferior (Zn, Ni, As, Sb, As, Tl e ETR); inferior (Ga, Sc, Sn, U, V, Y, Mo, Cu, Pb e Hg); equivalentes (apenas Nb e Zr); ligeiramente acima (Hf, Ta, W) e apenas se muito acima. Destacam-se como elementos-traços equivalentes ou ligeiramente abaixo ou acima da média crustal e dos folhelhos, aqueles normalmente estão ligados a minerais ultraestáveis, frequentes em materiais lateríticos (Ga, Sc, Sn, U, V, Y, Nb, Zr, Hf, Ta, W); aqueles em níveis muito baixo compreendem principais os metais alcalinos e alcalinos terrosos, Ba, Sr e Rb, bem como Mn, Co, Cs, Mo, Zn, Sb e ETR lixiviados geralmente no ambiente laterítico. Nos sedimentos do pântano não foram encontrados minerais capazes de hospedá-los em sua estrutura. Os valores em geral muito baixos, respondam provavelmente a diluição provocada pelas altas concentrações de MO carbonosa e silicosa co-sedimentada.

As grandes variações observadas nas concentrações dos elementos-traços no perfil da sequência sedimentar do pântano Mauritia (Tabelas 7 a 9) mostram que estão intrinsecamente relacionadas com a natureza mineralógica e o conteúdo da MO. As concentrações e suas variações permitem claramente delimitar as diferentes camadas e ainda a idade das mesmas. As concentrações em geral decrescem da base para o topo e são muito mais elevadas nas camadas marrons, rica em  $Fe_2O_3$  (goethita, hematita, siderita),  $Al_2O_3$  (caulinita) e  $TiO_2$  (anatásio) (Figuras 57 a 59). Somente as concentrações de Co, Mo, Cu, Zn, Ni, As, Cd, Bi, Au, Hg, Se e em parte enxofre se concentram preferencialmente nas camadas escuras (CEI e CES), ricas em MO, embora com valores cada vez menores para o topo. As, Hg, Mo, Ni e Se o fazem de forma contundente, e mostram sua forte afinidade a MO e TOT-S.

O padrão comum entre os ETR ao longo de toda sequência mostra que os mesmos estão ligados aos componentes inorgânicos (minerais), herdados das crostas lateríticas, cujas concentrações diminuem para as camadas mais jovens. Não se observa diferenças marcantes entre as camadas CMI, CEI e CMS. O elemento Lu, entretanto apresenta baixa afinidade com demais elementos terras-raras (Figura 60).

Da mesma forma que os elementos-maiores, os elementos-traço discriminam as camadas CMI, CEI, CMS e parcialmente a CES.

Observam-se assim dois padrões de distribuição geoquímica na sequência:

- 1) Elementos alcalinos, alcalinos terrosos e com similaridade de potencial iônico: Sr, Ba, Rb, Cs, Pb e Bi, possivelmente ligados aos argilo-minerais, cujas concentrações diminuem para o topo da sequência;
- 2) Elementos com tendência a comportamento residual (associados a minerais resistentes e/ou oxí-hidróxidos de Fe, cujas concentrações também diminuem para o topo da sequência): Ga, Zr, Hf, Nb, Ta, Sn, W, Y, Sc, Th, U e todos ETR.

**Tabela 7 – Concentrações dos elementos-traço nos sedimentos do pântano Mauritia.**

<b>Amostras</b>	<b>Be ppm</b>	<b>Sc ppm</b>	<b>V ppm</b>	<b>Co ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Zn ppm</b>	<b>Ga ppm</b>	<b>As ppm</b>	<b>Se ppm</b>	<b>Rb ppm</b>	<b>Sr ppm</b>	<b>Y ppm</b>	<b>Zr ppm</b>	<b>Nb ppm</b>	<b>Mo ppm</b>
<b>VM 23-27</b>	1,0	1,0	8,0	0,2	2,5	8,3	6,0	1,4	0,5	3,8	0,5	4,0	0,8	7,0	0,8	0,3
<b>VM 38-42</b>	1,0	1,0	10,0	0,2	2,9	13,1	4,0	1,9	0,5	3,9	0,5	4,1	1,1	11,4	0,8	0,2
<b>VM 78-82</b>	1,0	1,0	14,0	0,2	4,8	22,7	1,0	1,9	0,5	5,9	1,1	2,7	2,9	41,0	1,6	0,3
<b>VM 93-97</b>	1,0	1,0	16,0	0,3	4,0	16,5	3,0	2,2	0,5	5,1	0,9	2,7	2,5	32,0	1,6	0,2
<b>VM 134-138</b>	1,0	3,0	32,0	1,2	10,5	17,8	12,0	5,7	1,1	5,3	3,3	9,0	8,0	66,8	6,3	1,1
<b>VM 143-147</b>	1,0	6,0	77,0	1,2	8,2	16,5	17,0	10,2	1,0	3,0	3,8	11,0	13,0	154,0	12,6	2,0
<b>VM 155-159</b>	1,0	13,0	119,0	2,3	10,0	24,2	24,0	22,1	0,9	2,5	9,0	18,6	21,2	390,9	30,9	1,4
<b>VM 204-208</b>	1,0	7,0	68,0	2,9	9,8	20,3	24,0	12,2	0,5	1,3	4,9	9,5	13,3	188,1	16,4	0,7
<b>VM 219-223</b>	1,0	21,0	208,0	5,2	18,5	53,5	24,0	40,5	0,8	1,8	14,4	29,8	29,2	570,6	49,0	0,6
<b>VM 263-267</b>	1,0	4,0	47,0	2,4	18,6	30,2	35,0	8,1	1,7	8,0	3,0	6,5	10,6	84,8	7,1	2,5
<b>VM 285-289</b>	1,0	3,0	36,0	1,6	11,8	20,3	16,0	6,6	0,5	5,9	2,6	6,2	5,5	70,4	5,7	1,7
<b>VM 315-319</b>	1,0	7,0	73,0	2,3	16,4	32,7	50,0	15,2	0,5	5,1	5,9	12,8	11,0	209,6	16,0	1,9
<b>VM 342-346</b>	1,0	9,0	110,0	4,5	21,9	64,6	90,0	18,5	1,2	8,4	6,6	15,5	13,4	203,0	18,1	3,6
<b>VM 405-409</b>	1,0	6,0	53,0	2,6	16,7	57,6	40,0	10,4	2,3	10,8	3,4	10,8	11,7	102,1	10,4	2,1
<b>VM 422-426</b>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	48,3	49,5	71,0	N.D.	<0,5	3,7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,8
<b>VM 438-442</b>	1,0	17,0	156,0	6,2	19,0	42,0	77,0	25,5	0,5	3,3	12,5	25,3	25,7	347,4	27,8	1,9
<b>VM 458-462</b>	1,0	9,0	76,0	2,1	4,8	25,3	36,0	16,2	0,5	1,7	7,2	13,4	14,6	217,7	17,6	0,7
<b>Média</b>	1,0	6,8	68,9	2,2	13,5	30,3	31,2	12,4	0,8	4,7	5,0	11,4	11,5	168,6	13,9	1,3
<b>Máximo</b>	1,0	21,0	208,0	6,2	48,3	64,6	90,0	40,5	2,3	10,8	14,4	29,8	29,2	570,6	49,0	3,6
<b>Mínimo</b>	1,0	1,0	8,0	0,2	2,5	8,3	1,0	1,4	0,5	1,3	0,5	2,7	0,8	7,0	0,8	0,2
<b>Média Lago Cachoeira</b>	9,5	1,0	76,7	17,8	15,1	4,4	27,2	12,3	184,7	N.A.	18,8	2,4	19,2	30,6	1,5	0,1
<b>CTS</b>	3,1	7,0	53,0	11,6	18,6	14,3	52,0	14,0	2,0	0,1	110,0	316,0	237,0	1,4	26,0	1,4
<b>Folhelhos</b>	3,0	13,0	130,0	19,0	68,0	45,0	95,0	19,0	13,0	0,6	140,0	300,0	160,0	1,8	11,0	2,6

**CTS – crosta terrestre superior (Wedepohl, 1995).**

**Folhelhos (Turekian & Wedepohl, 1961).**

**N.D. – não detectado.**

**N.A. – não analisado.**

**Tabela 8** – Concentrações dos elementos-traço nos sedimentos do pântano Mauritia (Continuação).

Amostras	Ag ppm	Cd ppm	Sn ppm	Sb ppm	Cs ppm	Ba ppm	Hf ppm	Ta ppm	W ppm	Au ppm	Hg ppm	Tl ppm	Pb ppm	Bi ppm	Th ppm	U ppm
VM 23-27	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	27,0	0,3	0,1	0,5	1,9	0,2	0,1	1,9	0,1	0,7	0,1
VM 38-42	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	20,0	0,3	0,1	0,5	0,5	0,2	0,1	1,9	0,1	0,9	0,1
VM 78-82	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	41,0	1,1	0,1	0,5	0,5	0,2	0,1	2,8	0,1	2,2	0,3
VM 93-97	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	38,0	0,8	0,1	0,5	0,5	0,2	0,1	2,4	0,1	1,3	0,3
VM 134-138	0,1	0,2	1,0	0,1	0,3	44,0	2,3	0,4	0,8	0,5	0,2	0,1	7,1	0,1	5,1	0,7
VM 143-147	0,1	0,1	2,0	0,1	0,4	58,0	3,7	0,8	1,7	0,5	0,2	0,1	10,4	0,2	8,5	1,5
VM 155-159	0,1	0,1	4,0	0,1	1,0	101,0	10,3	2,0	3,9	0,5	0,1	0,1	19,0	0,6	17,6	3,5
VM 204-208	0,1	0,1	2,0	0,1	0,4	55,0	5,5	1,2	2,3	1,3	0,0	0,1	9,6	0,3	8,9	1,8
VM 219-223	0,1	0,1	7,0	0,1	1,1	206,0	15,4	3,4	6,3	0,5	0,2	0,1	29,7	0,9	29,2	5,1
VM 263-267	0,1	0,2	1,0	0,1	0,2	57,0	2,6	0,5	1,7	2,2	0,4	0,1	9,3	0,2	5,9	0,9
VM 285-289	0,1	0,1	1,0	0,1	0,2	57,0	1,9	0,3	1,1	4,1	0,2	0,1	6,5	0,1	4,1	0,7
VM 315-319	0,1	0,2	3,0	0,1	0,4	111,0	5,5	1,1	2,3	0,5	0,4	0,1	13,7	0,2	10,9	1,9
VM 342-346	0,1	0,3	3,0	0,1	0,4	140,0	6,3	1,2	2,6	2,0	0,5	0,1	23,2	0,5	13,6	2,2
VM 405-409	0,1	0,2	1,0	0,1	0,3	79,0	3,0	0,7	2,0	1,9	0,6	0,1	12,9	0,2	7,7	1,3
VM 422-426	<0,1	0,1	N.D.	<0,1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,7	0,3	<0,1	26,6	0,5	N.D.	N.D.
VM 438-442	0,1	0,2	5,0	0,1	1,5	146,0	9,5	2,1	3,6	0,5	0,2	0,1	23,3	0,5	20,1	4,2
VM 458-462	0,1	0,1	3,0	0,1	0,8	70,0	6,3	1,0	2,4	0,5	0,0	0,1	17,5	0,4	13,3	2,1
Média	0,1	0,1	2,3	0,1	0,5	78,1	4,7	0,9	2,0	1,3	0,2	0,1	12,8	0,3	9,4	1,7
Máximo	0,1	0,3	7,0	0,1	1,5	206,0	15,4	3,4	6,3	4,1	0,6	0,1	29,7	0,9	29,2	5,1
Mínimo	0,1	0,1	1,0	0,1	0,1	20,0	0,3	0,1	0,5	0,5	0,0	0,1	1,9	0,1	0,7	0,1
Média Lago Cachoeira	1,1	N.A.	2,4	1,1	0,8	57,9	0,2	1,2	2,3	N.A.	N.A.	2,3	2,2	2,4	1,4	0,4
CTS	0,1	0,1	25,0	0,3	5,8	668,0	5,8	15,0	N.A.	N.A.	0,1	0,8	17,0	0,1	10,3	2,5
Folhelhos	0,1	0,3	6,0	1,5	5,0	580,0	2,8	0,8	N.A.	N.A.	0,4	1,4	20,0	N.A.	12,0	3,7

CTS – crosta terrestre superior (Wedepohl, 1995).

Folhelhos (Turekian & Wedepohl, 1961).

N.D. – não detectado.

N.A. – não analisado.

**Tabela 9** – Concentrações dos elementos-traço (terras raras) nos sedimentos do pântano Mauritia.

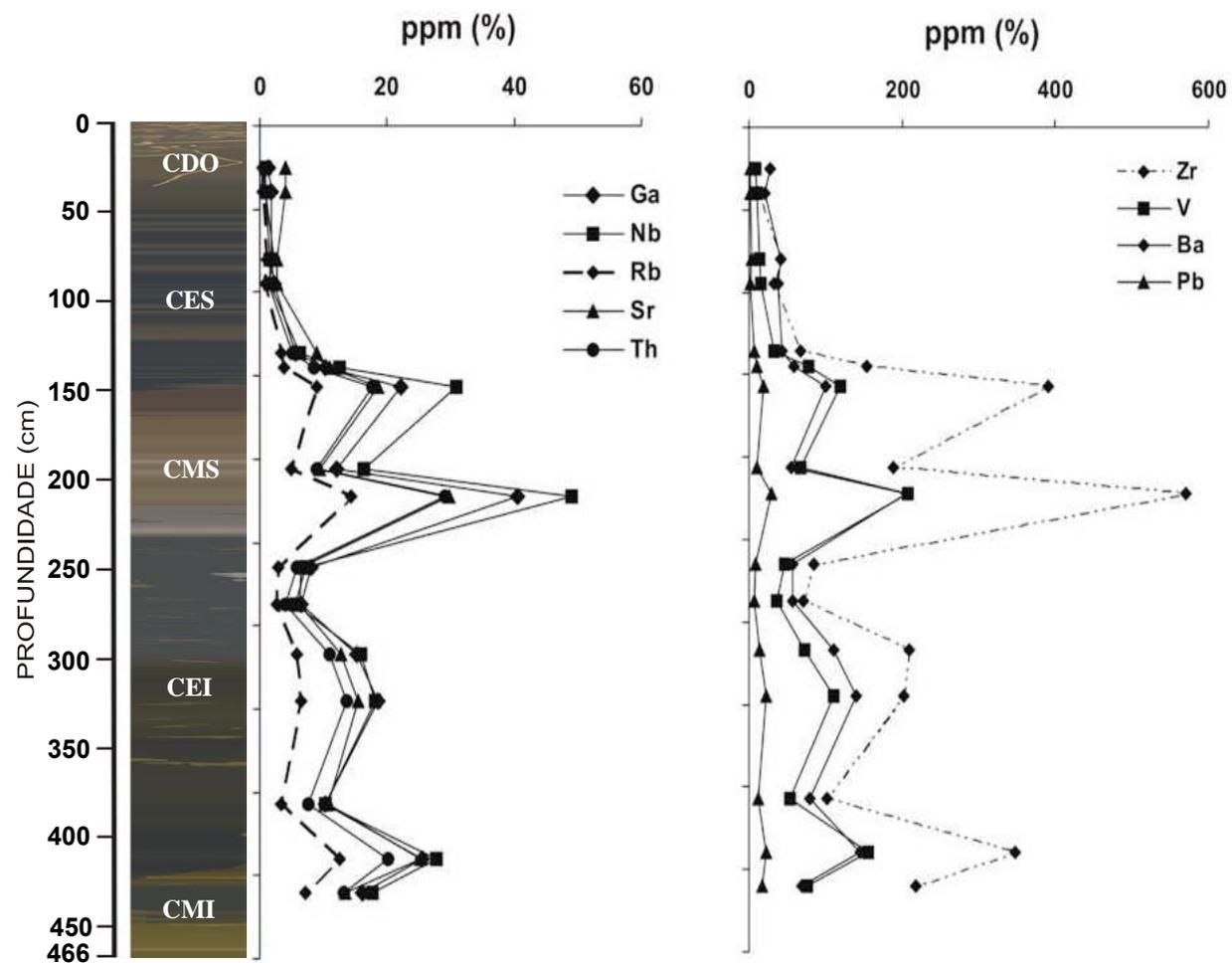
<b>Amostras</b>	<b>La ppm</b>	<b>Ce ppm</b>	<b>Pr ppm</b>	<b>Nd ppm</b>	<b>Sm ppm</b>	<b>Eu ppm</b>	<b>Gd ppm</b>	<b>Tb ppm</b>	<b>Dy ppm</b>	<b>Ho ppm</b>	<b>Er ppm</b>	<b>Tm ppm</b>	<b>Yb ppm</b>	<b>Lu ppm</b>
<b>VM 23-27</b>	1,50	3,40	0,36	1,40	0,22	0,06	0,19	0,04	0,11	0,03	0,08	0,02	0,07	0,01
<b>VM 38-42</b>	1,90	4,00	0,45	1,90	0,30	0,08	0,24	0,04	0,19	0,04	0,12	0,02	0,10	0,01
<b>VM 78-82</b>	4,00	7,90	0,89	2,70	0,54	0,12	0,52	0,08	0,40	0,09	0,26	0,04	0,26	0,03
<b>VM 93-97</b>	4,50	7,60	0,88	3,30	0,56	0,13	0,47	0,08	0,40	0,09	0,24	0,04	0,19	0,04
<b>VM 134-138</b>	13,10	28,00	3,17	11,80	1,91	0,44	1,94	0,26	1,37	0,27	0,73	0,12	0,74	0,10
<b>VM 143-147</b>	19,30	41,60	4,51	17,20	3,00	0,68	2,57	0,43	2,31	0,47	1,33	0,21	1,26	0,20
<b>VM 155-159</b>	27,50	54,30	5,82	21,50	3,91	0,89	3,56	0,66	3,85	0,80	2,43	0,38	2,64	0,39
<b>VM 204-208</b>	20,50	42,90	4,47	16,00	2,74	0,59	2,57	0,41	2,32	0,48	1,37	0,22	1,36	0,21
<b>VM 219-223</b>	40,00	75,10	7,75	27,20	4,96	1,17	4,64	0,86	5,12	1,07	3,18	0,54	3,64	0,55
<b>VM 263-267</b>	21,40	41,90	4,35	14,90	2,46	0,52	2,29	0,30	1,53	0,33	0,93	0,15	0,91	0,13
<b>VM 285-289</b>	12,00	23,00	2,29	8,60	1,42	0,30	1,09	0,18	0,94	0,20	0,60	0,10	0,61	0,09
<b>VM 315-319</b>	19,80	39,90	3,93	14,40	2,49	0,54	2,03	0,36	2,15	0,40	1,23	0,21	1,35	0,20
<b>VM 342-346</b>	22,80	46,40	4,82	17,00	2,87	0,67	2,83	0,43	2,35	0,52	1,43	0,24	1,55	0,22
<b>VM 405-409</b>	20,60	43,70	4,78	17,30	2,97	0,66	2,74	0,39	2,06	0,41	1,12	0,18	1,09	0,17
<b>VM 422-426</b>	N.D.													
<b>VM 438-442</b>	36,10	72,80	9,52	26,60	6,10	1,84	5,40	1,57	5,54	1,68	3,49	1,19	3,34	1,25
<b>VM 458-462</b>	28,10	59,40	6,09	20,00	3,29	0,73	3,14	0,48	2,74	0,55	1,59	0,25	1,60	0,23
<b>Média</b>	18,32	36,99	4,01	13,86	2,48	0,59	2,26	0,41	2,09	0,46	1,26	0,24	1,29	0,24
<b>Máximo</b>	40,00	75,10	9,52	27,20	6,10	1,84	5,40	1,57	5,54	1,68	3,49	1,19	3,64	1,25
<b>Mínimo</b>	1,50	3,40	0,36	1,40	0,22	0,06	0,19	0,04	0,11	0,03	0,08	0,02	0,07	0,01
<b>Média Lago Cachoeira</b>	22,13	43,20	4,51	15,59	2,97	0,66	2,62	0,49	2,43	0,54	1,47	0,25	1,50	0,24
<b>CTS</b>	32,30	67,70	1,60	25,90	4,70	0,95	2,80	0,50	2,90	0,62	0,95	N.A.	1,50	0,27
<b>Folhelhos</b>	92,00	59,00	5,60	24,00	6,40	1,00	6,40	1,00	4,60	1,20	2,50	0,20	2,60	0,70

**CTS** – crosta terrestre superior (Wedepohl, 1995).

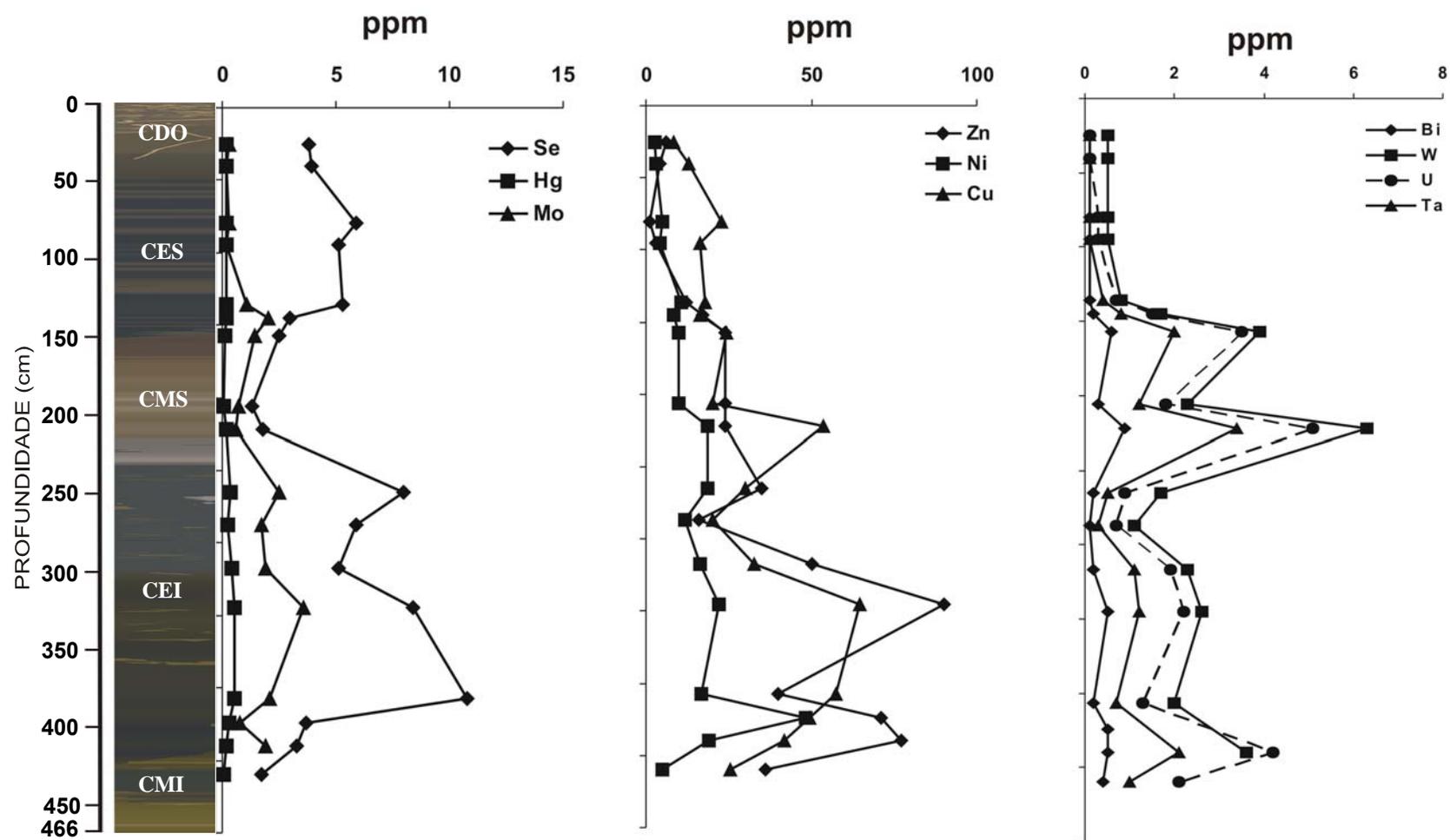
**Folhelhos** (Turekian & Wedepohl, 1961).

**N.D.** – não detectado.

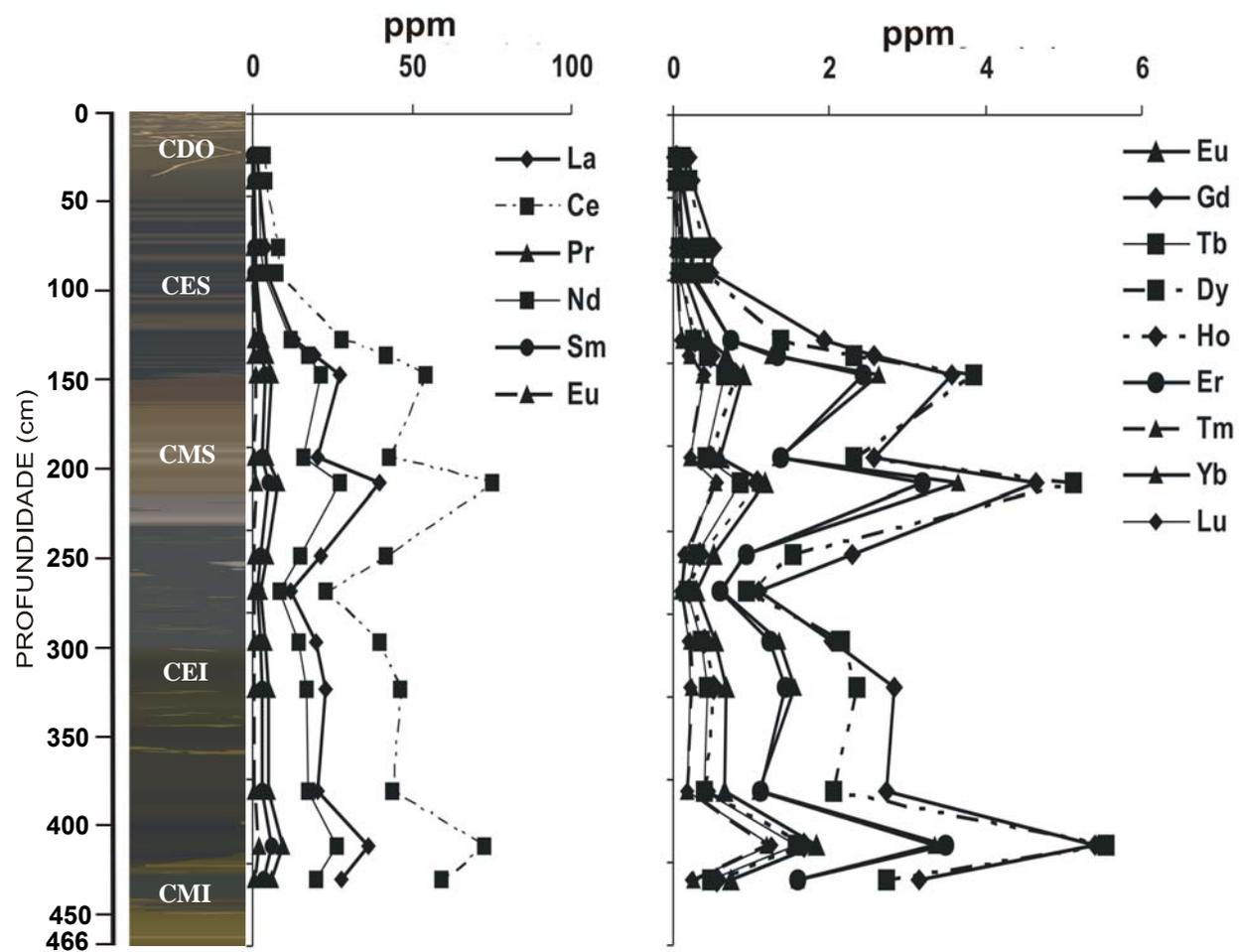
**N.A.** – não analisado.



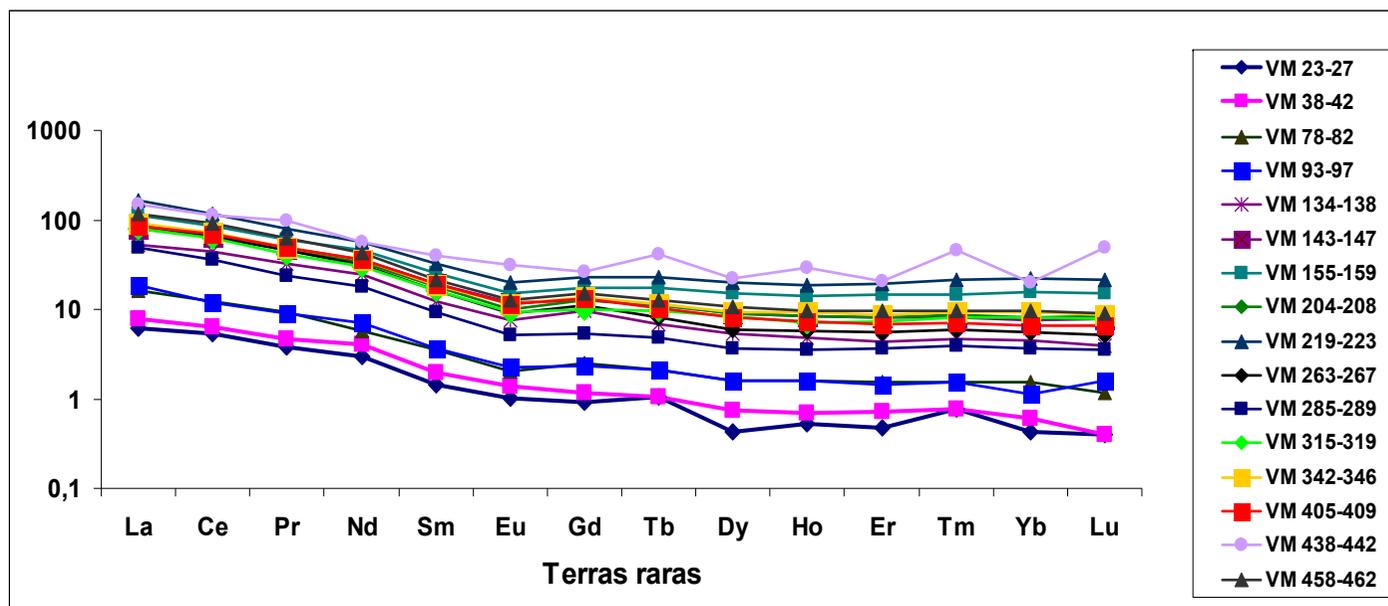
**Figura 57** – Distribuição das concentrações dos elementos-traço na sequência sedimentar do pântano Mauritia, evidenciando a dependência das concentrações mais elevadas com as camadas marrons (CES e CEI), com menor teor de MO, englobando elementos classicamente residuais (Ga, Nb, Th, Zr e V) e aqueles lixiviáveis (Rb, Sr, Ba).



**Figura 58** – Distribuição das concentrações dos elementos-traço na sequência sedimentar do pântano Mauritia, evidenciando a dependência das concentrações mais elevadas com as camadas marrons (CES e CEI), com menor teor de MO, englobando elementos classicamente residuais (Ga, Nb, Th, Zr e V) e aqueles lixiviáveis (Rb, Sr, Ba).



**Figura 59** – Distribuição das concentrações dos elementos-traço terras raras na sequência sedimentar do pântano Maurítia, evidenciando a dependência das concentrações mais elevadas com as camadas marrons (CES e CEI), com menos MO.



**Figura 60** – Distribuição dos elementos terras raras normalizados aos condritos, em que se resalta claramente as amostras das camadas marrons com valores muito mais altos e as de topo com valores mais baixos. Todas, no entanto, apresentam mesmo padrão de distribuição, exceto VM 438-442 e VM 263-267, de transição camada marrom-camada escura.

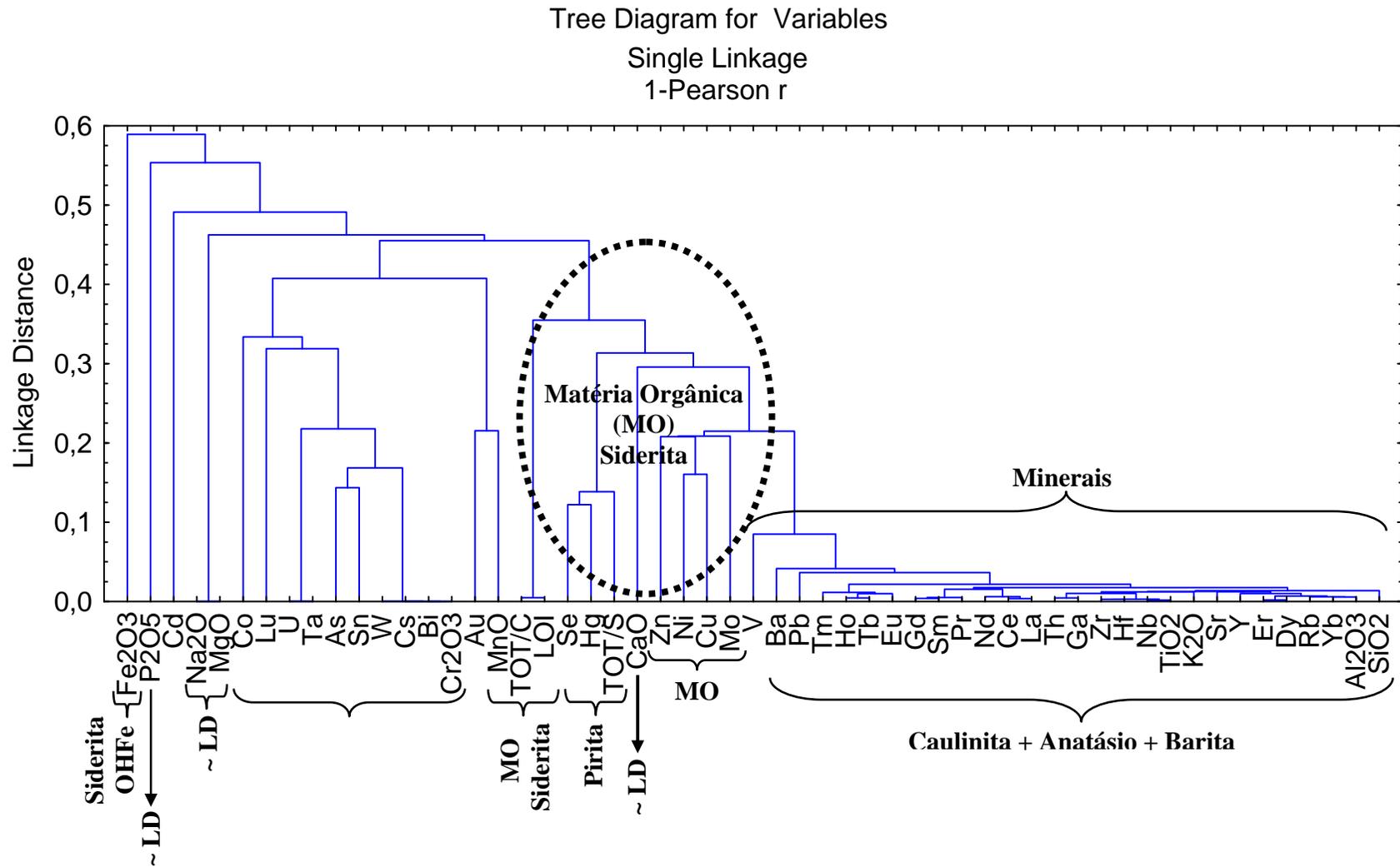
### 3.6.3 Associações geoquímicas

As matrizes de correlações (ANEXO), os coeficientes de correlação entre pares de elementos (Figuras 62 a 66) e as análises de agrupamento (cluster) para os mesmos elementos (dendrograma da Figura 61) permitiram, como já foi parcialmente previsto pela distribuição das concentrações, três associações geoquímicas de elementos químicos podem ser claramente identificadas:

- 1.) Si-Al-K-Ti-Ba-Ga-Hf-Nb-Rb-Sr-Th-V-Zr-Y-La/Yb-Pb-(Cu-Zn-Ni);
- 2.) (PF-C<sub>tot</sub>)-As-Lu-Cs-U-W-Bi-Ta-Sn-(Co)-(Cd)-(Ni);
- 3.) S<sub>tot</sub>-Hg-Se- (Mo-Cu-Zn-Ni)-(As)-(C<sub>tot</sub>-PF).

*Associação: Si-Al-K-Ti-Ba-Ga-Hf-Nb-Rb-Sr-Th-V-Zr-Y-La/Yb-Pb-(Cu-Zn-Ni)*

É constituída pelos dois elementos mais abundantes, Si e Al, que constituem quartzo e caulinita e argilominerais amorfos, além hidróxidos de Al, bem como Ti, e daqueles elementos que como dito, são classicamente relacionados com minerais ultra-estáveis em ambiente laterítico, exceto Ba, Sr, Rb, Pb e (Cu-Zn-Ni) que podem estar relacionados aos argilominerais, além disso encontram-se em concentrações muito baixas. Representam fundamentalmente as camadas marrons com menor quantidade de MO. As correlações entre os elementos desta associação são altamente significativas (Figuras 61), fortalecendo a afinidade entre eles e aos minerais mencionados. A natureza argilosa e sua intimidade com os óxidos de TiO<sub>2</sub>, como anatásio, são reforçados pelas excelentes correlações SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O-Rb-Pb), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – (TiO<sub>2</sub>-Ga), indicando que vieram de mesma fonte (Figura 62). O mineral anatásio como principal carreador de elementos estáveis, como Zr, Th, Nb, e mesmo ETR é sugerido pelas excelentes correlações lineares positivas (Figura 63). A correlação positiva Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ga é bem típica de ambiente laterítico e persiste no pântano (Figura 64).



**Figura 61** – Análise de agrupamento (dendrograma) entre os elementos químicos analisados em todas as amostras de sedimentos do pântano Mauritia, indicando as principais associações geoquímicas e suas afinidades mineralógicas e com a MO.

Surpreende a ausência de correlação entre Th e U e Nb-Ta, mostrando que estes elementos possam estar contidos em mais de uma fase mineral, antagônicas, mesmo que em pequenas concentrações. Provavelmente minerais primários contendo-os foram alterados e estes elementos absorvidos em novas estruturas, como argilas complexas amorfas, a própria barita.

Outra variação geoquímica distinta é a ausência de correlação positiva entre Fe-V, um fato comum, principalmente em lateritos. O Fe está ausente desta associação e não apresenta correlação positiva com nenhum elemento analisado. O vanádio apresenta excelente correlação com todos os membros da associação, por exemplo, com SiO<sub>2</sub> (Figura 63).

A ausência do Fe nesta associação é surpreendente, mostrando que o mesmo foi mineralogicamente modificado, de oxi-hidróxidos para carbonato, a siderita. O comportamento distributivo das correlações Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ressaltam bem estes aspectos, em que também se observa um grupo de amostras com correlação positiva (teores medianos de Al e Fe) outra negativa (teores altos de Al e Fe) (Figura 62). As correlações com Fe, quando presentes, são negativas e tendem a logarítmicas, como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – PF (As). Fe-V, quiçá Fe-As, mostram duas tendências uma positiva, refletindo parte da ambiência laterítica preservada como oxi-hidróxidos de Fe (goethita e hematita) e sua alteração para siderita, que se espelha possivelmente na outra correlação, que é negativa (Figura 65).

*Associação: (PF-C<sub>tot</sub>)-As-Lu-Cs-U-W-Bi-Ta-Sn-(Co)-(Cd)-(Ni)*

Os elementos desta associação se encontram em concentrações relativamente baixas, e mostram forte relação com as camadas ricas em MO, e são, portanto antagônicos àqueles da associação anterior. Embora aparentemente estranho U, Bi, W, Ta e Sn, que se enriquecem relativamente em perfil laterítico, encontram-se nos sedimentos do pântano Mauritia relacionados principalmente a MO, indicando que de fato minerais residuais lateríticos foram modificados no ambiente lacustre e parte dos elementos liberados, incorporados ao domínio orgânico de origem vegetal. São significativas e positivas as correlações Cs-Bi, Cs-U, W-U, que reforçam esta conclusão.

*Associação: S<sub>tot</sub>-Hg-Se-(Mo-Cu-Zn-Ni)-(As)-(C<sub>tot</sub>-PF).*

Esta associação é formada por poucos elementos, em geral com concentração baixa, ligada as camadas ricas em MO e com S<sub>tot</sub>. As correlações com Mo-Cu-Zn-Ni-As são menos significativas, mas dignas de nota, e realçam a ligação clássica destes elementos com minerais de enxofre, como os sulfetos, o mais comum a pirita e MO vegetal. As correlações de S<sub>tot</sub> com Hg-Se são positivas e muito significativas (Figura 65), com menor significância com As (Figura 65). Embora não tenham sido detectados sulfetos, é provável que ocorram em pequena quantidade, pois os teores de S alcançam 1%. Sulfatos foram identificados como barita. E provável que barita seja um produto de oxidação da pirita.

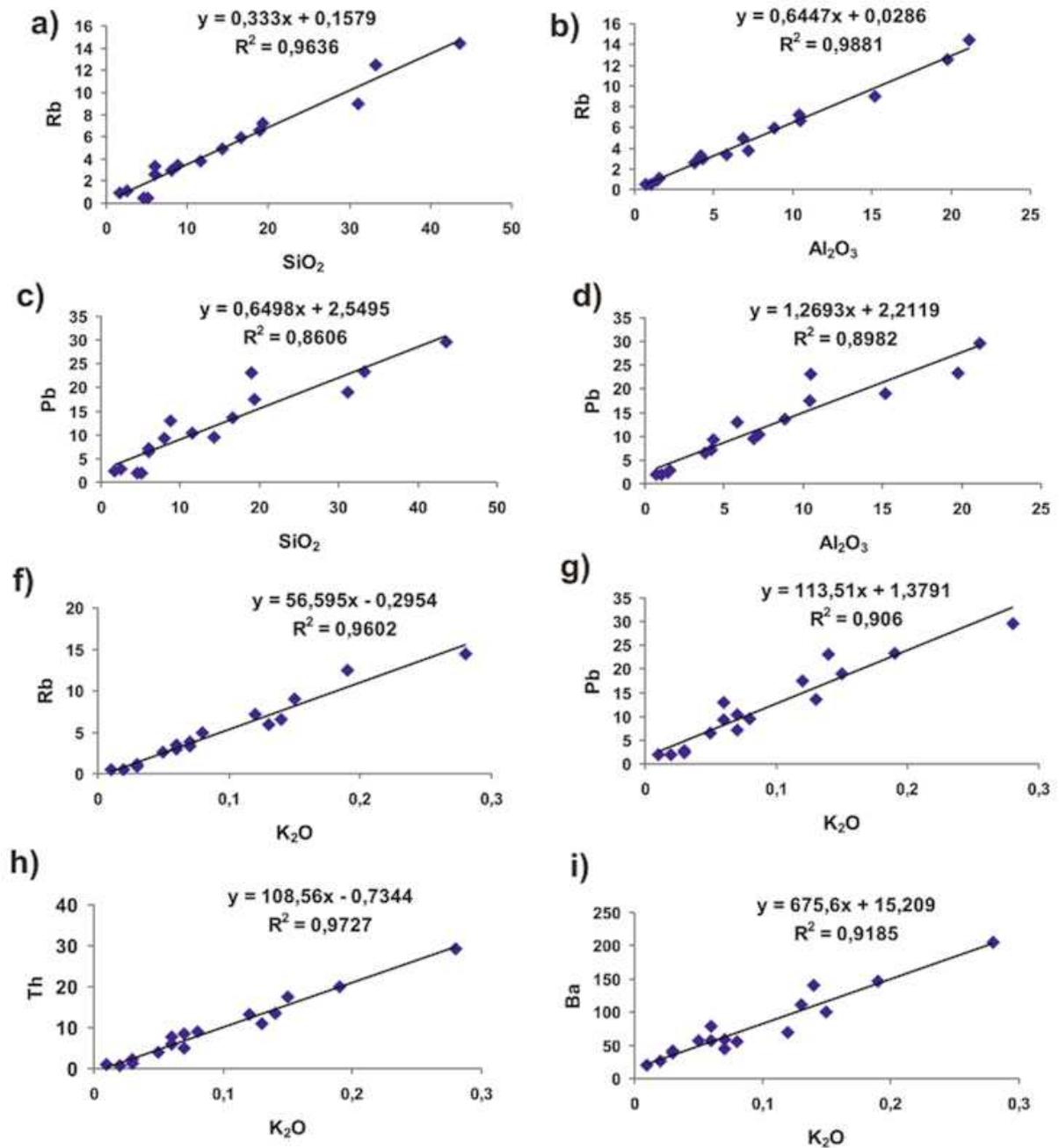
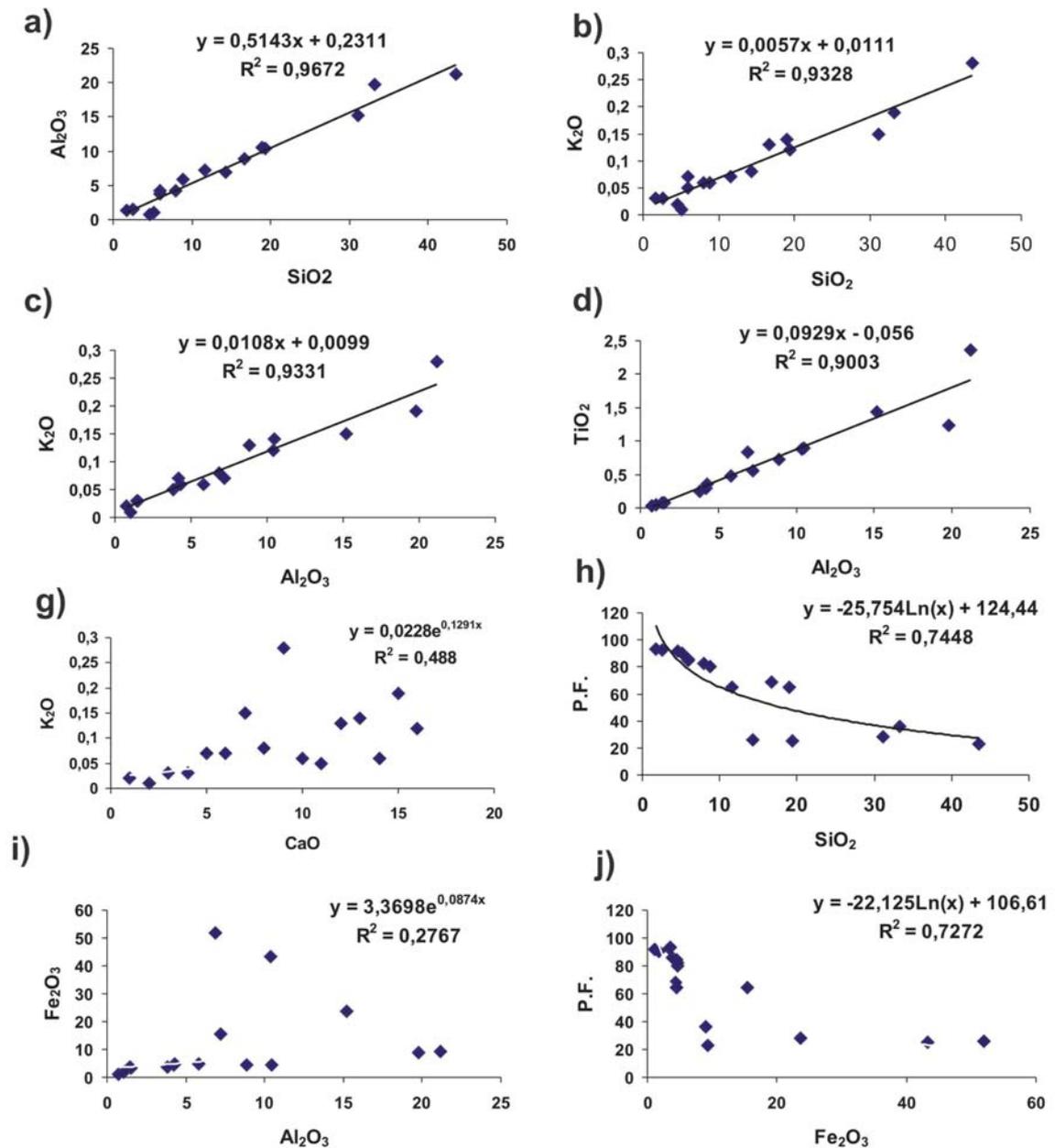


Figura 62 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás.



**Figura 63** – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás.

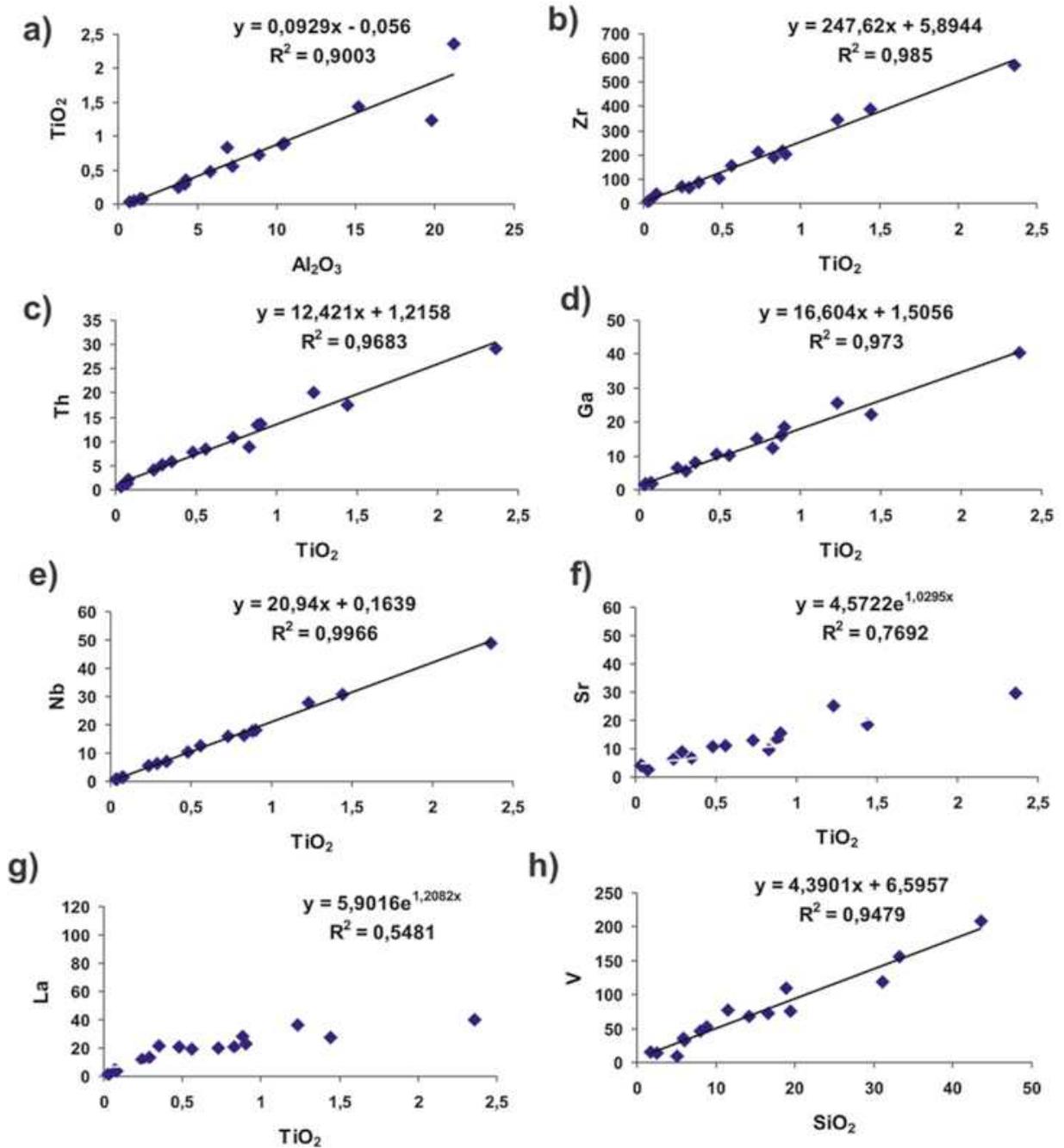


Figura 64 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Maurítia, Serra Sul, em Carajás.

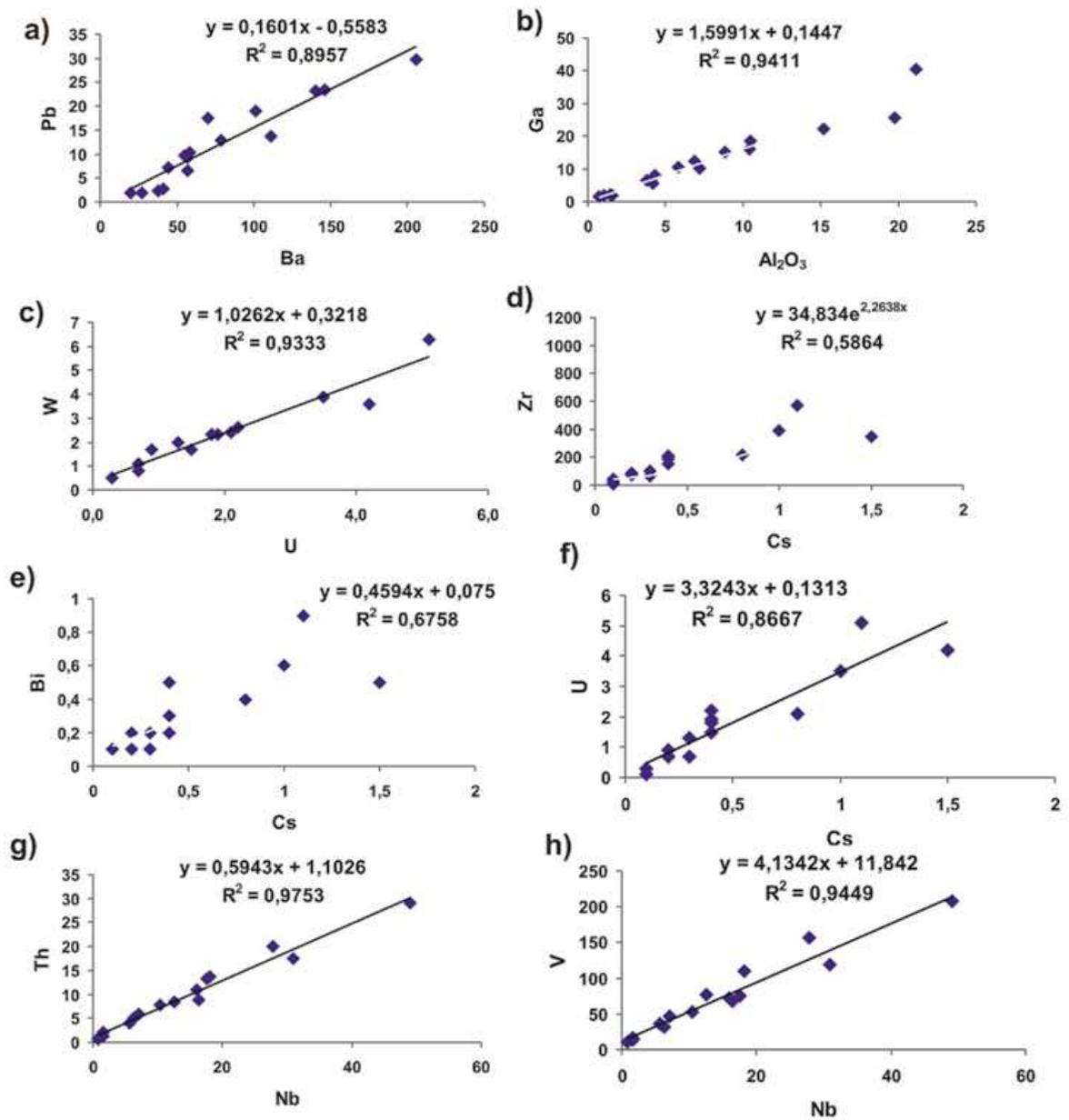


Figura 65 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás.

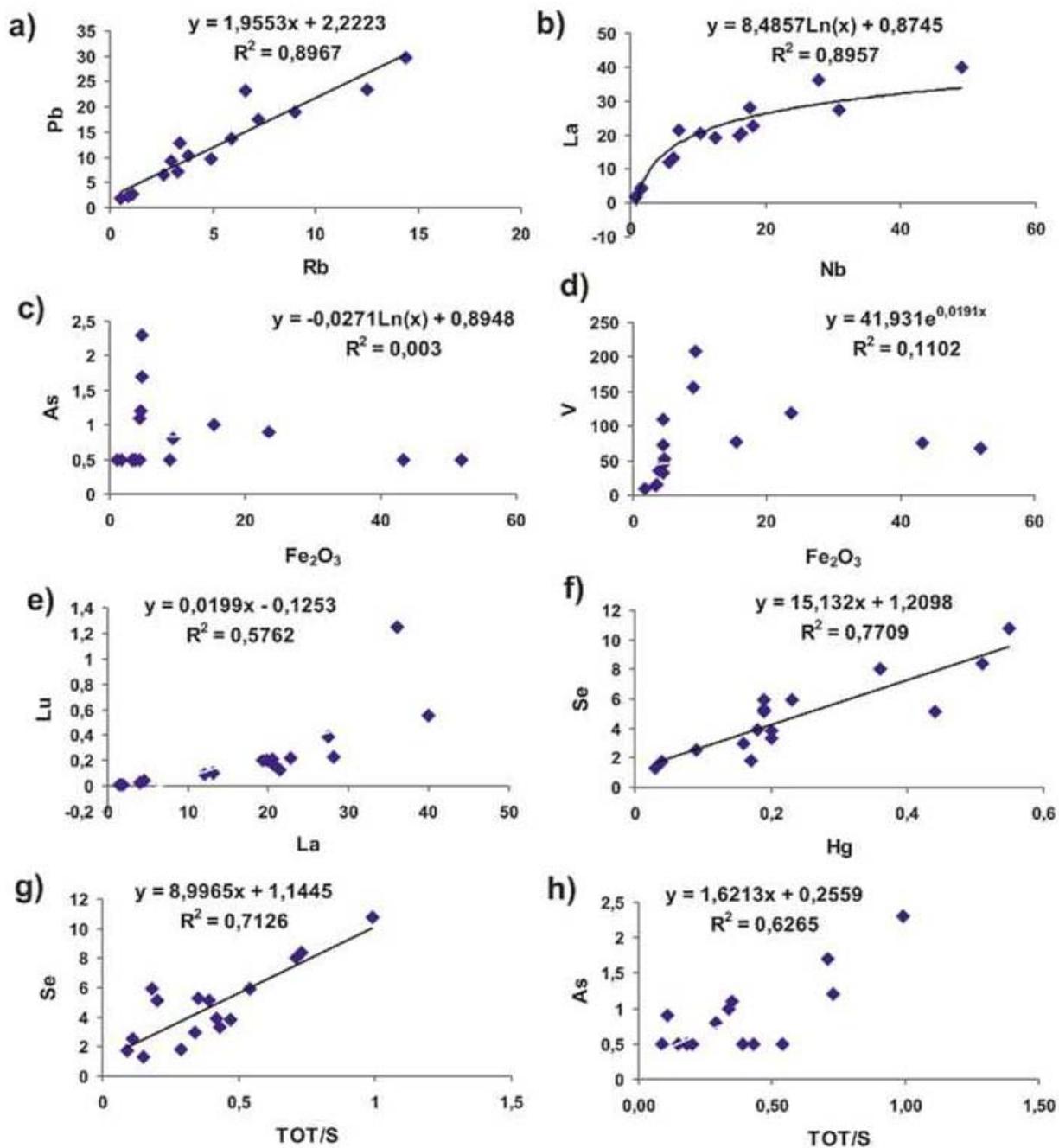


Figura 66 – Correlações entre elementos químicos nos sedimentos do pântano Mauritia, Serra Sul, em Carajás.

### 3.6.4 Químioestratigrafia Isotópica

Os resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  em carbonatos variam de -18,1 a 1,07‰ e na matéria orgânica variam de -25,4 a -29,2‰ (Tabela 10).

O carbono orgânico contém informações referentes à presença e ausência de espécies de plantas com ciclos fotossintéticos  $\text{C}_3$  (baixa  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) e  $\text{C}_4$  (alta  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ), são plantas fisiológica e ecologicamente distintas, com isso fornecem também interações entre vegetação e clima (Dai & Fan 1986, Seitz & Kanninen 1989, Worbes & Junk 1989).

Durante o processo de fotossíntese há uma discriminação isotópica das plantas com relação ao  $\text{CO}_2$ , desta forma permitindo identificar o carbono derivado de cada ciclo fotossintético no reservatório da matéria orgânica. Plantas com ciclo fotossintético  $\text{C}_3$  reduzem o  $\text{CO}_2$  a um composto com três carbonos (fosfoglicerato) (Schönhofer 1992), estas dominam ecossistemas boreais aos trópicos englobando 85% das espécies, com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de aproximadamente -32‰ a -22‰ (Polge 1978, Craig 1954).

Na sequência sedimentar do pântano Mauritia os dados isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  obtidos da análise isotópica da matéria orgânica dos sedimentos das camadas CEI e CES são indicadores de plantas  $\text{C}_3$  (Figura 67), características de clima quente e úmido.

As espécies  $\text{C}_4$  compreendem 5% das espécies de plantas (Polge 1978), sendo em sua maioria gramíneas de origem tropical e subtropical (Leavitt 1990), com produtividade fortemente correlacionada com temperatura (Olsson 1992). Reduzem o  $\text{CO}_2$  a um composto com quatro carbonos (ácido aspártico ou málico) e apresentam valores maiores de  $\delta^{13}\text{C}$ , aproximadamente -17‰ a -9‰, pois discriminam menos contra  $\text{CO}_2$  durante a fotossíntese (Craig 1954).

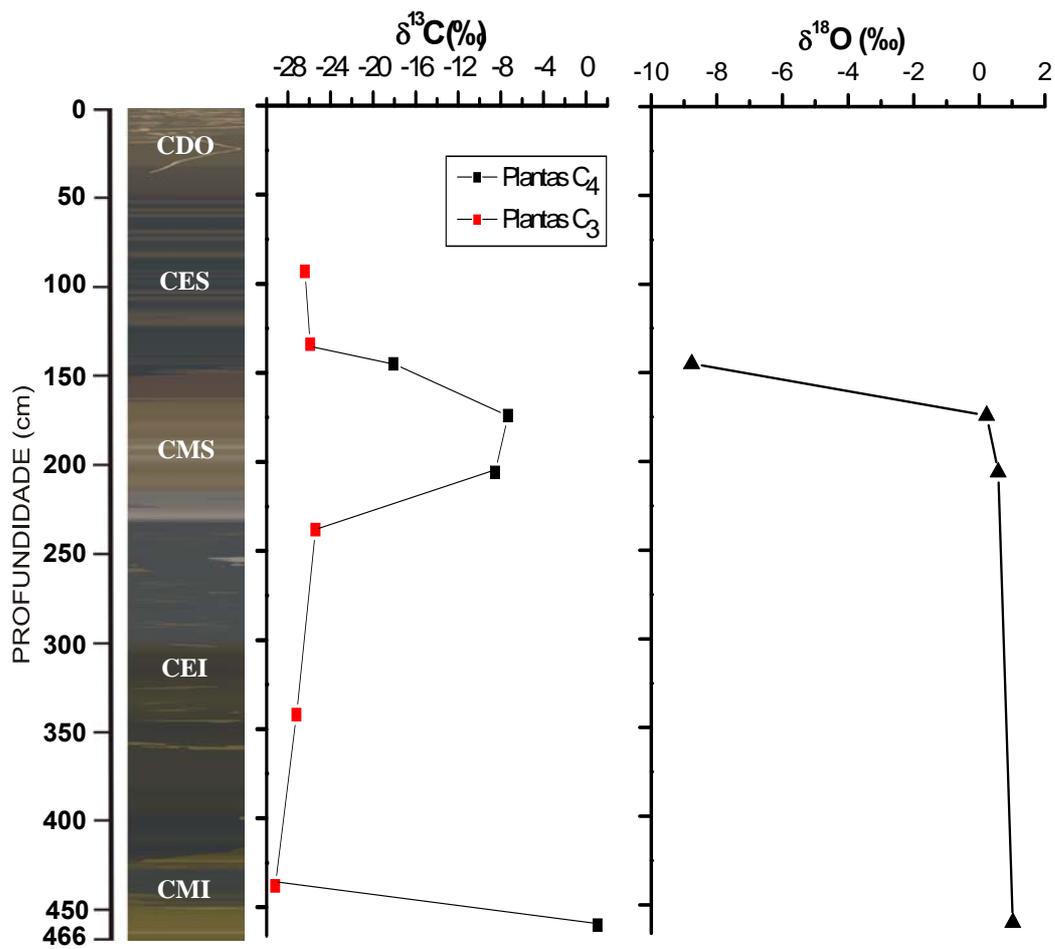
Os valores obtidos da análise isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$  para carbonatos nos sedimentos correspondentes as camadas CMI e CMS, indicam predominância de plantas  $\text{C}_4$  (Figura 67), características de clima seco.

Os dados de  $\delta^{18}\text{O}$  das camadas CMI, CMS e CES revelam uma tendência decrescente da base para o topo corresponde a -8,77 a 1,07‰. A proporção de isótopos de oxigênio ( $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$ ) dos carbonatos lacustres é controlada pela temperatura (Henderson *et al.* 2002), onde o fator mais importante no controle da evolução isotópica é o balanço hídrico (influxo/evaporação) (Talbot 1990, Kelts & Talbot 1990, Talbot & Kelts 1990, Lister *et al.* 1991, Talbot 1994, Anadón *et al.* 1994, Mohammed *et al.* 1995, Valero Garcés *et al.* 1995).

O aumento da evaporação em relação ao influxo tende a produzir um enriquecimento no isótopo  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$  mais positivo), correspondente a CMI (+1,03‰) e CMS (+0,58‰ e +0,22‰), portanto clima seco e com temperatura mais elevada. Quanto ao influxo tende a produzir um enriquecimento em  $^{16}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$  mais negativo), correspondente a CES (-8,77‰) (Tabela 10 e Figura 67), clima úmido e temperatura mais baixa.

**Tabela 10** - Valores dos isótopos  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  para amostras analisadas.

<b>Nome das amostras</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math> (‰)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b><math>\delta^{18}\text{O}</math> (‰)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
VM 143-147	-18,1	0,28	-8,77	1,18
VM 172-176	-7,33		0,22	
VM 204-208	-8,56		0,58	
VM 458-462	1,07		1,03	



**Figura 67** - Perfil quimoestratigráfico com a distribuição dos valores isotópicos  $\delta^{13}\text{C}$  (em carbonatos e na matéria orgânica) e  $\delta^{18}\text{O}$  para o pântano Mauritia.

#### 4 EVOLUÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO NA ÁREA DO PÂNTANO MAURITIA

Os dados geológicos, granulométricos, mineralógicos, radiocarbônicos, isotópicos e geoquímicos obtidos para 466 centímetros de sedimentos sondados na área hoje ocupada pelo pântano Mauritia permitiram estabelecer o seguinte quadro evolutivo, apresentado de forma esquemática na sequência abaixo. Seis fases evolutivas principais foram identificadas:

**1. O ambiente pré-sedimentação** – Estava-se no Pleistoceno Tardio. Anterior ao estabelecimento dos primeiros sedimentos amostrados no pântano, a paisagem estava dominada por superfície alta, talvez acima dos atuais 900 m de altitude máximos, já que certamente acompanhou a perda de altitude como subida no nível do mar durante o último máximo glacial. O seu contorno deveria já ser ondulado, com morros e quiçá depressões e alguns vales, em parte como o é nos dias atuais. Um relevo na forma geral de planalto, que se desenvolveu sobre crostas lateríticas ferruginosas (minério de ferro de alto teor), por vezes, ferro-aluminosas, derivadas basicamente de formações ferríferas bandadas, e ainda de forma restrita de rochas vulcânicas a subvulcânicas básicas. As crostas são muito espessas, podendo ultrapassar os 100m, e foram originadas durante o extenso e profundo evento de lateritização matura ainda limiar Cretáceo-Terciário, que atingiu grande parte da Amazônia (Costa *et al.* 2007). O clima deve ter sido seco e cálido, pois não foi encontrado registro de sedimentos. Nesta época a Amazônia estava sob os efeitos da última glaciação e a maioria dos estudos registra essas condições (Colinvaux *et al.* 1996; De Oliveira 1996; Absy *et al.* 1991; Colinvaux *et al.* 2000; De Oliveira & Curtis 2001). O clima ameno não promoveu o intemperismo químico das crostas e muito pouco físico, até porque as crostas são muito duras e quimicamente resistentes, permitindo apenas o acúmulo de detritos em pequenas depressões.

**2. Início da sedimentação dos sedimentos do pântano Mauritia** – É ainda Pleistoceno Tardio, pré-52.000 anos AP. Persiste a paisagem dos platôs altos com topo ondulados, dominado por morros e vales, que ao contrário da paisagem anterior, se acentuaram pelo aumento da erosão e abatimentos internos em decorrência do aparecimento de maior volume de água, dando origem a várias depressões fechadas em várias partes dos platôs de Carajás, propiciando o início à formação de vários e pequenos lagos tanto ao norte como ao sul de Carajás. O clima continua

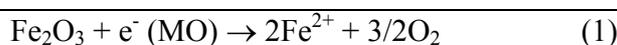
seco, menos cálido e experimenta umidade temporária, intermitente. A vegetação restringe-se provavelmente a arbustos nas encostas e gramíneas isoladas no entorno da área do atual pântano, que poderia ser uma depressão sub-circular ou oval. Esta feição é ainda parcialmente visível na paisagem. As inúmeras depressões e vales, abertos e fechados, parecem ligados ainda a formação das crostas lateríticas, representando feições cársticas. Conexões subterrâneas entre os mesmos são freqüentes. Depósitos pretéritos de talus de grandes expressões não ocorrem no topo do planalto. Sobre estas depressões inicia-se o acúmulo por gravidade e enxurrada de detritos originados das crostas, não alterados por intemperismo químico. Forma-se a CMI com seus 50 cm de espessura, que podem ser muito variáveis, conforme o local de amostragem. O domínio de uma mineralogia a base de minerais de ferro (goethita e siderita, por vezes hematita), caulinita e argilas complexas, pouco quartzo e por sua vez ainda de uma associação geoquímica com forte componente laterítico, reforçam o domínio de detritos de crosta. A depressão da lagoa das Cavernas na Serra Sul, que experimenta longa temporada anual seca pode ser um retrato do pântano no Pleistoceno Tardio (Figura 68).



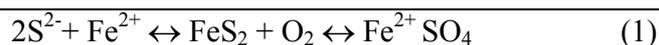
**Figura 68** – Imagem da lagoa da Caverna, na Serra Sul em Carajás, que pode representar como seria a lagoa pré-pântano no Pleistoceno Tardio, há 52.000 anos AP.

**3. Primeira fase de sedimentação lacustre** – Entre 50.000 e 40.000 anos AP a depressão forrada com a camada CMI foi coberta por águas quase perenes. O clima tornou-se mais úmido, as temperaturas elevaram-se, e como consequência a vegetação tornou-se mais exuberante, principalmente nas encostas. Isto é demonstrado pela deposição da espessa camada de sedimentos escuros silto-argilosos riquíssimos em matéria orgânica vegetal carbonosa e parcialmente silicosas (CEI). Possível presença de cauxi e diatomáceas reforça o ambiente aquoso, em águas entre 1 e 2 m de profundidade. Esta sedimentação se estendeu por cerca de 10.000 e alternadamente foi interrompida ou recebeu contribuições de detritos finos provenientes da região de entorno, representado por material pouco alterado das crostas lateríticas. Estima-se que pelo menos uns 250 cm de material foi depositado neste período, que posteriormente com a diagênese e oxidação da MO e compactação reduziu-se aos atuais 200 cm (415 a 238 cm de profundidade). Esse ambiente rico em MO e água promoveu a alteração diagenética da camada CMI, como a redução dos OHFe por oxidação da MO, que juntos promoveram a formação da siderita, da mesma forma que a barita, via pirita e oxidação do enxofre. Neste ambiente ácido as argilas são parcialmente amorfizadas e capacitadas em adsorver cátions. Mais tarde com as novas mudanças ambientais, em condições sub-alcálicas argilas complexas amorfas se formarão a partir de caulinitas, sílica opalina e os cátions Mg, Ca, Ba, K e Sr, liberados, mesmo que em pequenas quantidades. Neste ambiente as associações geoquímicas lateríticas são desfeitas e novas se estabelecem, como aquelas ligadas a MO e a  $S_{tot}$ . A atual lagoa Cachoeira com seus 100 a 150 cm de profundidade seria um espelho parcial do pântano entre 50.000 e 40.000 anos AP.

***Siderita***



***Barita***



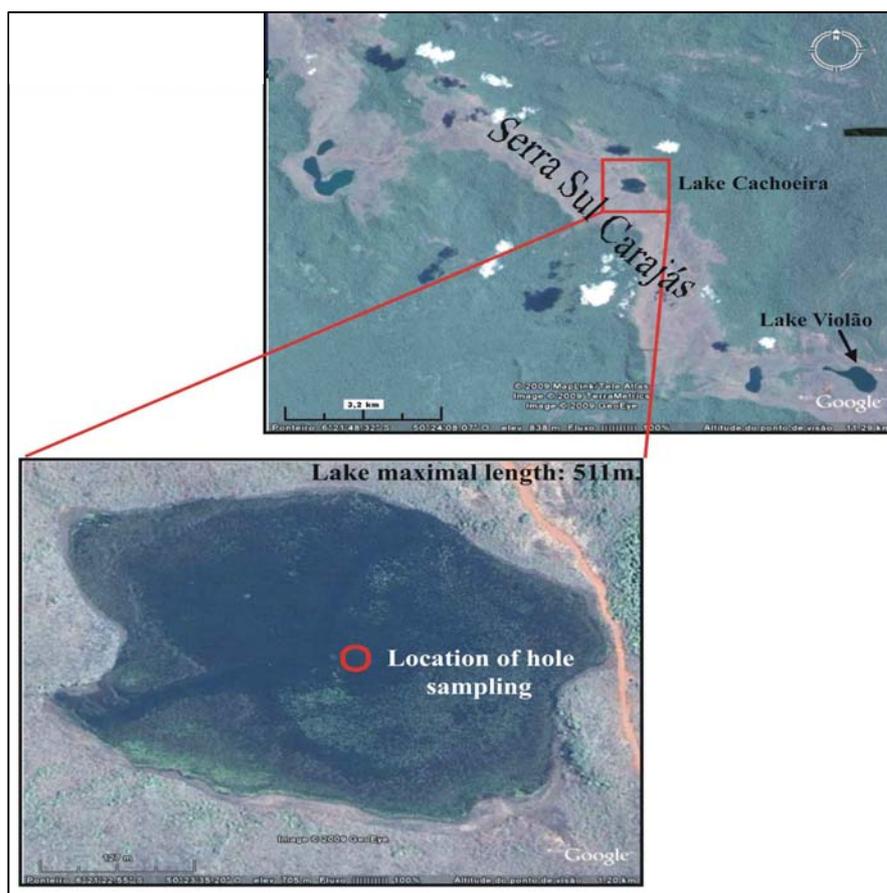
**4. Longa fase sem sedimentação e/ou com sedimentação detrítica do entorno interrompida e intercalada com lacustre.** Encontra-se entre 40.000 e 8.000 AP. O clima retoma a condição mais seca, semi-árida, baixa umidade, intercalando-se em curtos períodos com condições similares a primeira fase de sedimentação. Estas condições são indicadas pela camada CMS: granulometria síltica, cor marrom, mineralogia dominada por goethita/hematita, caulinita e em parte siderita, que conseqüentemente se apresenta com quimismo de crostas lateríticas e associação geoquímica puxada pelo Al-Si e elementos ultra-estáveis. Parece ter sido um longo período de parada na sedimentação ou sedimentação muito restrita, em que detritos finos das crostas lateríticas foram depositados ou arrastados, e intermitentemente cobertos por delgadas camadas de material cinza escuro rico em MO, conferindo a camada como um todo o aspecto bandado. Não encontra paralelo ainda nos lagos e brejos atuais em Carajás.

**5. Segunda fase de sedimentação lacustre** - A partir de 7.500 AP a depressão ocupada hoje pelo pântano Mauritia foi novamente palco de ambiente lacustre, que aparentemente não experimentou interrupções significativas até o presente. Depositaram-se neste intervalo de tempo cerca de 150 cm de sedimentos. Os dados obtidos permitem concluir que o clima se tornara gradualmente mais úmido e quente, indicado pela grande abundância de vida vegetal aquática acumulada, além de animal, que se intensificou ainda mais nos últimos 7.000 anos AP (a 93 cm de profundidade de sedimentos). A contribuição detrítica diminuiu gradualmente ainda mais e foi quase interrompida a partir dos últimos 50 cm de sedimentos do topo, a partir de 3.785 anos AP, indicada pela camada CDO, dominada por MO vegetal carbonosa e silicosa. A vegetação arbustiva e graminosa invadiram o lago, transformando-o em pântano e formando a planura do futuro pântano. A taxa de erosão das encostas com crostas lateríticas do atual pântano parece ter diminuído fortemente, sustentada por arbustos e gramíneas e pela vegetação mais adensada nas margens úmidas da bacia.

Essa espessa camada orgânica, principalmente os 100 cm inferiores também infringiu grandes transformações diagenéticas na camada inferior CMS, mas aparentemente em menor expressão, tanto mineralógica como geoquímica, como demonstrado anteriormente.

**6. Surgimento do pântano Mauritia** – Não foi possível precisar no tempo quando o pântano com árvores de buriti (*Mauritia flexuosa*) e outras espécies se instalou, mas certamente foi

concomitante ou mesmo logo após a iniciação do pântano, que ao atingir o nível de extravasamento das águas da bacia-vale, criou uma drenagem, renovando suas águas durante o período chuvoso, como parte do ciclo pluvial equatorial que se instalava definitivamente na região provavelmente a partir de 3785 anos AP. Este fato é indicado pela acumulação da camada CDO, formada praticamente apenas por MO vegetal. A formação de veredas, como exemplificada pelo pântano Mauritia, se sucedeu às bacias sedimentares lacustres e assoreamento de vales, sendo encontradas com muita frequência tanto na Serra Sul como Serra Norte de Carajás. A ausência de material detrítico inorgânico nos últimos 50 cm confirma a ocupação da área por vegetação nas margens e vegetação aquática pantanosa, impedindo a chegada de detritos, e ao mesmo tempo a ocupação das encostas por vegetação de savana e muitas gramíneas. Entre 7450 anos AP e 3785 anos AP o pântano Mauritia seria talvez um lago como o atual lago Cachoeira, na Serra Sul em Carajás (Figura 69).



**Figura 69** – Imagem da lagoa Cachoeira (Costa 2009), na Serra Sul em Carajás, que pode representar como seria a lagoa pré-pântano Mauritia, entre 7450 e 3785 anos AP.

## 5 CONCLUSÃO

O atual pântano Mauritia na Serra Sul em Carajás, representado por 466 cm de sedimentos, restritos em uma área pantanosa localizada intravale, cortjada na zona central por uma sutil vereda, filete corrente de água, já foi por dois momentos uma lagoa ocupada por 1 a 2 m de água e muita vegetação aquática e fixa em suas encostas e margens. A sucessão de sedimentos depositou-se nos últimos 50.000 anos, portanto a partir do Pleistoceno Tardio. Ela compreende duas grandes fases de acúmulo de detritos inorgânicos provenientes das crostas lateríticas do entorno, depositados por gravidades e enxurradas e duas fases de deposição de detritos orgânicos vegetais carbonosos, e em parte silicosos, em condição lacustre, com inorgânicos restritos, e alternados em camadas delgadas restritas, principalmente na CEI. Essa sucessão indica que a partir do Pleistoceno Tardio, o clima que antes era semi-árido a árido, cálido, pelo menos na região das serras do Carajás, a partir de então experimenta mudança em direção a clima menos seco e com pulsações úmidas, dando oportunidade ao desenvolvimento de vegetação de campo arbustivo e graminoso, e acúmulo temporário de água nas depressões do planalto esculpido sobre crostas lateríticas ferruginosas. A primeira fase lacustre aconteceu entre 50.000 e 40.000 anos AP, e uma longa fase seca, com sedimentação restrita, predominantemente detrítica, com finas camadas com MO, ou ausência de sedimentação, aconteceu entre 40.000 e 8.000 anos AP. A segunda fase iniciada a aproximadamente 8.000 anos AP, mostra o domínio lacustre, que se estende até atualidade, representando a instalação do clima quente e úmido na região, com vegetação savânica no topo do platôs dominado por crostas lateríticas.

Portanto os dados sedimentológicos, mineralógicos, geoquímicos, radiocarbônicos e isotópicos permitiram identificar mudanças climáticas acentuadas de semi-árida a úmidas e quentes na região de Carajás a partir do Pleistoceno Tardio. Esses dados mostram também que a mineralogia e assinatura geoquímica das crostas foram parcialmente alteradas pela diagênese, proporcionada pela grande quantidade de matéria orgânica acumulada na bacia do pântano Mauritia.

Este panorama geológico Pleistocênio-Hocolênico é similar aquele apresentado pelos sedimentos lacustres de um lago na Serra Sul (Lagoa Cachoeira) e outro na serra Norte (Lagoa Grande).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Absy M.L. & Van der Hammen T. 1976. Some palaeocological data from Rondonia, southern part of the Amazon Basin. *Acta Amazônica*, v.6, **3**:293-299.
- Absy M.L. 1985. Palynology of Amazonia: the history of the forests as revealed by the palynological record. In Prance G.T., Lovejoy T.E. (Ed.). *Amazonia*. New York: Pergamon Press: 72-82.
- Absy M. L., Cleef M., Fournier A., Martin L, Servant M., Sifeddine A., Silva M.F., Soubies F., Suguio K., Turcq B., Van der Hammen T. 1991. Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60.000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, **312**:673-678.
- Aiken, G. R., McKnight, D. M., Wershaw, R. L., MacCarthy, P. 1985. Humic substances in soil, sediment and water: geochemistry, isolation and characterization. *New York: John Wiley & Sons*: 363-385.
- Almeida F.F.M., Hasuy Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**: 1-29.
- Amorim M.A., Moreira-Turcq P.F., Turcq B., Perez M.A.P., Cordeiro R. C. 2005. Caracterização e Quantificação da Composição Mineralógica e Granulométrica dos Sedimentos Superficiais da Várzea do Lago Grande de Curuai, Pará. In: SBGQ, Congresso Brasileiro de Geoquímica. Porto de Galinhas, 10, *Anais*, CD-ROM.
- Anadón P., Utrilla R., Julià R. 1994. Palaeoenvironmental reconstruction of a Pleistocene lacustrine sequence from faunal assemblages and ostracod shell geochemistry, Baza Basin, SE Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **111**: 191-205.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge-João X.S., Costa J.B.S. 1988. A Megaestruturação Arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: SBG, Congresso Latino-Americano de Geologia. Belém, 7, *Resumos*, p. 324-338.
- Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures, 1976. *Elsevier Scientific publishing Company Amsterdam-Oxford-New York*.
- Avelar V.G., Lafon J.M., Correia JR.F.C., Macambira E.M.B. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã–Província Mineral de Carajás: Novos dados geocronológicos. *Rev. Bras. Geoc.*, **29**: 453-460.
- Barros C.E.M., Barbey P. 2000. Carajas Mining Province: Shear belt or plutono-metamorphic belt?. In: IUGS, International Geology Congress. Rio de Janeiro, 31, *Abstract Volume*, CD-ROM.
- Behling H., Negret A.J., Hooghiemstra H. 1998. Late Quaternary vegetational and climatic change in the Popayán regom, southern Colombian Andes. *J. Quaternary Science*, **13**: 43-53.
- Behling H. & Costa M. L. 2000. Holocene Environmental Changes from the Rio Curuá Record in the Caxiuanã Region, Eastern Amazon Basin. *Quaternary Research*, **53**: 369-377.
- Behling H. 2001. Late Quaternary environmental changes in the Lagoa da Curuçã region (eastern Amazonia) and evidence of Podocarpus in the Amazon lowland. *Vegetation History and Archaeobotany*, **10**: 175-183.

- Behling H. & Costa M. L. 2001. Holocene vegetational and coastal environmental changes from the Lago Crispim record in north eastern Para State, eastern Amazonia. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **114**: 145-155.
- Behling H., Keim G., Irion G., Junk W., Mello J.N. 2001. Holocene environmental changes in the Central Amazon Basin inferred from Lago Calado (Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **173**: 87-101.
- Bush M.B. 1994. Amazonian speciation: a necessarily complex model. *Journal Biogeography*, **21**: 5-17.
- Bush M.B., Miller M.C., de Oliveira P.E., Colinvaux P.A. 2002. Orbital forcing signal in sediments of two Amazonian lakes. *J. Paleolimnology*, **27**: 341-352.
- Carvalho L.F. 2006. Caracterização físico-química da água e mineralógica e química do material em suspensão e de sedimento de fundo do lago Amapá (Acre). Belém. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 205p.
- Colinvaux P.A., De Oliveira P.E., Moreno J.E., Miller M.C., Bush M.B. 1996. A long pollen record from lowland Amazonia: forest and cooling in Glacial times. *Science*, **274**: 85-87.
- Colinvaux P.A., De Oliveira P.E., Bush M.B. 2000. Amazonian and neotropical plant communities on glacial time-scales: The failure of the aridity and refuge hypotheses. *Quaternary Sciences Reviews*, **19**: 141-160.
- Colinvaux P.A. & Oliveira P.E. 2001. Amazon plant diversity and climate through the Cenozoic. *Palaeogeogr. Palaeoclim., Palaeoecol.*, **166**: 51-63.
- Corrêa S.L.A. 1996. Evolução geoquímica das crostas lateríticas e dos sedimentos sobrepostos na estrutura de Seis Lagos (Amazonas). Belém. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 160p.
- Costa M.L., Moraes E.L., Behling H., Melo J.C.V., Siqueira N.V.M., Kern D.C. 1997. Os sedimentos de fundo da Baía de Caxiuanã. In: P.L.B. (org.), *Caxiuanã*. Belém. Museu Emílio Goeldi, p.121-137.
- Costa M.L., Carmo M.S., Behling H. 2005b. Mineralogia e Geoquímica de Sedimentos Lacustres com Substrato Laterítico na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(2)**: 165-176.
- Costa M. L., Menezes M. E. N. S., Carvalho L. C. F., Costa J. A. V. 2007. Produção bibliográfica sobre ambientes lacustres no Brasil. *Revista Acta Geográfica*, **I**: 113-122.
- Costa M. L., Carvalho A. T., Behling H., Hermanowski, B. 2009. Lake landscape on lateritic iron crust over high plateaus in the eastern Amazon. In: LATEINAMERIKA KOLLOQUIUM, Goettingen, Abstracts and Program. UNIVERLLAG GOETTINGEN, 1, p. 67-68.
- Costa R.L., Turcq B.J., Cordeiro R.C., Carneiro Filho A., Bernardes M. 2005a. Sedimentação Lacustre e Paleoambiental na Região de Acarabixi, Médio Rio Negro, Amazonas. In: SBGQ, Congresso Brasileiro de Geoquímica. Porto de Galinhas, 10, *Anais*, CD-ROM.
- Craig H. 1954. Carbon-13 variations in sequoia rings and the atmosphere. *Science*, **119**: 141-143.

- Dai K., Fan C.Y. 1986. Bomb produced  $^{14}\text{C}$  content in tree rings grown at different latitudes. *Radiocarbon*, **28 (2A)**: 346-349.
- Dall'agnol R., Souza Z.S., Althoff F.J., Barros C.E.M., Leite A.A.S., Jorge João X.S. 1997. General aspects of the granitogenesis of the Carajas Metalogenetic Province. *In*: CBPM, International Symposium of Granites and Associated Mineralizations. Salvador, 2, *Excursion guide*, p. 135-161.
- De Oliveira P.E. & Curtis J. 2001. Vegetação e clima durante o último ciclo glacial na Amazônia equatorial: o registro palinológico da Serra do Maicuru. *In*: ABEQUA, Mariluz-Imbé, 8, Boletim de Resumos.
- Desjardins T., Carneiro Filho A., Mariotti A., Chauvel A., Girardin C. 1996. Changes of the forest-savanna boundary in Brazilian Amazonia during the Holocene as revealed by soil organic carbon isotope ratios. *Oecologia*, **108**:749-756.
- DOCEGEO (DISTRITO AMAZÔNIA). 1988a. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. *IN*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém. *Anais*. Belém: SBG-NO, v.1, p. 10-54. Anexo.
- DOCEGEO (RIO DOCE GEOLOGIA E MINERAÇÃO). 1988b. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In*: CVRD/SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, 35, *Província Mineral de Carajás: Litoestratigrafia e principais depósitos minerais*. p. 11-59.
- Elias V.O., Simoneit B.R.T., Cordeiro R.C., Turcq B. 2001. Evaluating levoglucosan as an indicator of biomass burning in Carajás, Amazônia: A comparison to the charcoal Record. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **65(2)**: 267-272.
- Ferreira I.M. 2005. Bioma Cerrado: Caracterização do Subsistema de Vereda. *In*: EREGEO, Encontro Regional de Geografia. Porto Nacional (TO), 9, *Anais*, disco compacto, 7p.
- Filho A.C., Tatumi S.H., Yee M.. 2003. Dunas fósseis na Amazônia. *Ciência Hoje*, **32 (191)**: 24-29.
- Hirata W.K., Rigon J.C., Kadokaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. *In*: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, 1, *Anais*, p. 100-110.
- Hooghiemstra H. & Van Der Hammen T. 1998. Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: the forest refugia hypothesis, and a literature overview. *Earth-Sci. Rev.*, **44**: p. 147-183.
- Horbe A.M.C., Horbe M.A., Nogueira A.C.R. 2005. Geochemistry of Holocene Lacustrine Sediments – Central Amazonia. *In*: SBGQ, Congresso Brasileiro de Geoquímica. Porto de Galinhas, 10, *Anais*, CD-ROM.
- Huhn S.R.B., Santos A.B.S., Amaral A.F., Ledsham E.J., Gouveia J. L., Martins L.B.P., Montalvão R.M.G., Costa V.G. 1988. O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria - Sul do Pará. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, 35, *Anais*, **3**, p.1438-1453.
- Jackson M. L. 1958. Soil Chemical Analysis. Englewood Cliffs, Inc., *Prentice-Hall*.
- Kelts K. R., Talbot M. R. 1990. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental changes and biotripartite interactions, Large Lakes: Ecological Structure and Function (eds. Tilzer, M. M., Serruya, C.), *Madison: Science & Technology Publishers*: 288-315.

- Kokonova M.M. 1966. *Pergamion Press*, 450p.
- Leavitt S.W. 1990. Isotopes and trace elements in tree rings. *In: INTERNATIONAL DENCROCHRONOLOGICAL SYMPOSIUM*. Yastad, Proceedings: 182-190.
- Ledru M.P. 1992. Modifications de la végétation du Brésil Central entre la dernière époque glaciaire et l'interglaciaire actuel. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, serie 2*. v.314, **2**:117-123.
- Ledru M.P. 1993. Late Quaternary and climatic changes in Central Brazil. *Quaternary Research*. **39**:90-98.
- Leite A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 330p.
- Lister G. S., Kelts K., Zao, C. K., Yu, J-Q, Nissen F. 1991. Lake Qinghai, China:closed basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the latest Pleistocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **84**: 141-162.
- Macambira M.J.B., Lancelot J.R. 1996. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, Southeastern Amazonian Cráton, Brazil. *International Geology Review*, **38**: 1134-1142.
- Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências da Terra*, **7**: 263-288.
- Machado N., Lindenmayer Z.G., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**: 329-354.
- Mayle F.E., Burbridge R., Killeen T.J. 2000. Millennial-Scale Dynamics of Southern Amazonian Rain Forests. *Science*, **290**: 2291-2294.
- Mohammed M. U., Bonnefille R., Johnson T.C. 1995. Pollen and isotopic records in Late Holocene sediments from Lake Turkana, Kenya. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **119**: 371-383.
- Nogueira A.C.R., Trunckenbrodt W., Pinheiro R.L.V. 1995. Formação Águas Claras, Pré-cambriano da Serra dos Carajás: redescritção e redefinição litoestratigráfica. *Boletim Museum Paraense Emílio Goeldi* **7**: 177-197.
- Olsson I.U., Possnert G. 1992.  $^{14}\text{C}$  activity in different sections and chemical fractions of oak tree rings, AD 1938-1981. *Radiocarbon*, **34 (3)**: 757-767.
- Pessenda L.C.R., Valencia E.P.E., Camargo P.B., Telles E.C.C., Martinelli C.A., Cerri C.C., Aravena R., Rozanski K. 1996a. Natural radiocarbon measurements in brazilian soils developed on basic rocks. *Radiocarbon*, **38**: 203-208.
- Pessenda L.C.R., Aravena R., Melfi A.J., Telles E.C.C., Boulet R., Valencia E.P.E., Tomazello M. 1996b. The use of carbon isotopes ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in central Brazil. *Radiocarbon*, **38**: 191-201.

- Pessenda L.C.R., Aravena R., Melfi A.J., Telles, E.C.C., Boulet R., Cruz M.V.L., Roveratti L., Pessin G. 1996c. Avaliação de mudanças de vegetação na Amazônia ocidental durante o Holoceno com emprego dos isótopos do carbono do solo. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, 39, Anais*, p.539-544.
- Pessenda L.C.R., Gouveia S.E.M., Gomes B.M. Aravena R., Boulet R., Ribeiro A.S. 1997. Studies of paleovegetation changes in the central Amazon by carbon isotopes of soil organic matter. *In: Symposium on Isotope Techniques in the Study of past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere the Atmosphere. IAEA. Vienna, 46, p. 645-652.*
- Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, **166**: 159-171.
- Pimentel M.M., Machado N. 1994. Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, 38, Resumos expandidos, 2*: p.390-391.
- Polge H. 1978. Fifteen years of wood radiation densitometry. *Wood Science Technology*, **12**: 187-196.
- REDE RODOVIÁRIA DO PNV 2001. *Plano Nacional de Viação*. Situação Física: Rede Federal.
- Rocha J.C., Rosa A.H. 2003. Substâncias húmicas aquáticas, interação com espécies metálica. Ed. UNESO, São Paulo.
- Sardinha A.S., Dall'agnol R., Gomes A.C.B., Macambira M.J.B., Galarza M.A. 2004. Geocronologia Pb-Pb e U-Pb em zircão de granitóides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá (MG), 42, Resumos, CD-ROM.*
- Schönhofer F. 1992.  $^{14}\text{C}$  in austrian wine and vinegar. *Radiocarbon*, **34 (3)**: 768-771.
- Seitz R.A., Kanninen M. 1989. Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil: Preliminary results. *IAWA Bulletin*, **10 (2)**: 170-174.
- Servant M., Fontes J.C., Rieu M., Saliège J.F. 1981. Phases climatiques arides holocènes dans le sud-ouest de l'Amazonie (Bolívie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, serie 2*, **292**: 1295-1297.
- Seyler P., Viers J., Barroux G., Pinelli M., Boaventura G. R. 2005. Role of the Floodplain lakes in the Trace Element Dynamics of the Amazon River. *In: SBGQ, Congresso Brasileiro de Geoquímica. Porto de Galinhas, 10, Anais, CD-ROM.*
- Sifeddine A., Martin L., Turcq B., Volkmer-Ribeiro C., Soubiès F., Cordeiro R.C., Suguio K. 2001. Variations of the Amazonian rainforest environment : a sedimentological record covering 30,000 years. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoeco.*, **168**: 221-23.
- Sifeddine A., Wirrmann D., Albuquerque A.L.S., Turcq B., Cordeiro R.C., Gurgel M.H.C., Abrão J.J. 2004. Bulk composition of sedimentary organic matter used in palaeoenvironmental reconstructions: examples from the tropical belt of South America and Africa. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoeco.*, **214**: 41-53.

- Soubiés F. 1980. Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons dans les sols (6000 - 3000 ans B.P.). *Cahiers ORSTOM., Série Géologie*, **1**: 133-148.
- Soubiés F., Suguio K., Martin L., Leprun J.C., Servant M., Turcq B., Fournier M., Delaune M., Sifeddine A. 1991. The quaternary lacustrine deposits of the Serra dos Carajás (state of Pará, Brazil)- ages and other preliminary results. *Bol. IG-USP, Publ. Esp.*, **8**: 223-243.
- Souza S.R.A. (1987) Estudo da material orgânica em sedimentos do manguezal de Coroa Grande, Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro. Tese de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, p.104.
- Souza Z.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S. 1996. Carajás mineral province: geological, geochronological and tectonic constrast on the Archean evolution of the Rio Maria granite-greenstone terrain and the Carajás block. *In: SBG, Symposium. Archean Terranes of the South American Platform.* p. 31-32.
- Stevenson F.J. 1982. Humus chemistry. *New York: Wiley & Sons*: 26-53.
- Suguio K., Absy M.L., Flexor J.M., Ledru M.P., Martin L., Sifeddine A., Soubiés F., Turcq B., Ybert J.-P. 1993. The evolution of the continental and coastal environments during the last climatic cycle in Brazil (9120 Ky. B.P. to Present). *Boletim IG-USP, Série Científica*, **24**: 27-41.
- Suguio K. 1999. *Geologia do Quaternário e mudanças ambientais: passado + presente = futuro ?*. São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas., 366p.
- Talbot M. R. 1990. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic-ratios in primary lacustrine carbonates, *Chemical Geology. Isot. Geosci. Sect.*, **80**: 261-279.
- Talbot M.R. & Kelts K. 1990. Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates from carbon-rich lacustrine sediments. *In: B.J. Katz (Ed.), Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs. American Association of Petroleum Geologists, Memoir* **50**: 99-112.
- Tan K.H 1982. Principles of soil chemistry. Ed. Marcel Dekker, Inc. New York., basel.
- Talbot, M.R. 1994. Paleohydrology of the Late Miocene Ridge basin lake, California. *Geological Society of America Bulletin*, **106**: 1121-1129.
- Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22 (3)**: 174-182.
- Teixeira J.B.G., Beisiegel V.R. 2006. *Carajás: Geologia e Ocupação Humana*. Museu Paraense Emílio Goeldi. 470p.
- Turcq B., Suguio K., Martin L., Flexor J.M. 1993. Registros milenares nos sedimentos dos lagos da serra dos Carajás. *Ciência Hoje*, **16**: 31-35.
- Turcq B., Albuquerque A.L.S., Cordeiro R.C., Sifeddine A., Simões Filho F.F.L., Souza A.G., Abrão J.J., Oliveira F.B.L., Silva A.O., Capitâneo J. 2002. Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology*, **148**: 319-342.
- Turekian K. & Wedepohl K. H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **72**: 175-192.

Valero Garcés B.L., Kelts K., Ito E. 1995. Oxygen and carbon isotope trends and sedimentological evolution of a meromitic and saline lacustrine system: the Holocene Medicine Lake basin, North American Great Plains, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **117**: 253-278.

Van der Hammen T. & Absy M.L. 1994. Amazonia during the last glacial. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **109**: 247-261.

Vasquez M.L., Sousa C.S., Carvalho G.M.A. (Orgs.) 2008. Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém.

Victoria R.L., Fernandes F., Martinelle L.A., Piccolo M.C., Camargo P.B., Trumbore S. 1995. Past vegetation changes in the Brazilian pantanal arboreal-grassy savanna ecotone by using carbon isotopes in the soil organic matter. *Global Change Biology*. **1**:165-171.

Walkley A. & Black I. A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and inorganic soil constituents. *Soil Science*, **63**: 251-263.

Wedepohl K. H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **59(7)**: 1217-1232.

Worbes M., Junk W.J. 1989. Dating tropical trees by means of  $^{14}\text{C}$  from bomb tests. *Ecology*, **70 (2)**: 503-507.

**ANEXOS**

	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	Cr2O3	LOI	Sum	Sc	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr
SiO2	1																							
TiO2	1,00	1																						
Al2O3	1,00	1,00	1																					
Fe2O3	0,98	0,97	0,97	1																				
MnO	0,21	0,21	0,21	0,20	1																			
MgO	0,88	0,89	0,89	0,86	0,25	1																		
CaO	0,67	0,67	0,67	0,65	0,33	0,52	1																	
Na2O	0,88	0,89	0,88	0,86	0,27	1,00	0,51	1																
K2O	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,89	0,67	0,89	1															
P2O5	0,87	0,88	0,88	0,85	0,24	0,75	0,50	0,76	0,88	1														
Cr2O3	0,61	0,61	0,61	0,59	-0,17	0,68	0,05	0,67	0,61	0,61	1													
LOI	0,73	0,77	0,75	0,59	0,14	0,69	0,51	0,69	0,77	0,67	0,49	1												
Sum	0,90	0,91	0,91	0,88	-0,04	0,85	0,55	0,83	0,91	0,71	0,79	0,72	1											
Sc	0,24	0,21	0,22	0,25	-0,26	0,33	-0,26	0,32	0,21	0,29	0,85	0,03	0,45	1										
V	0,24	0,21	0,22	0,24	-0,29	0,32	-0,26	0,31	0,21	0,29	0,84	0,06	0,45	0,99	1									
Co	0,88	0,88	0,88	0,86	0,24	0,75	0,51	0,75	0,88	0,75	0,68	0,68	0,88	0,34	0,35	1								
Ni	0,99	1,00	1,00	0,95	0,20	0,88	0,67	0,88	1,00	0,87	0,61	0,78	0,91	0,22	0,23	0,88	1							
Cu	0,96	0,95	0,95	0,89	0,19	0,84	0,64	0,84	0,95	0,83	0,58	0,76	0,86	0,25	0,27	0,84	0,97	1						
Zn	-0,12	-0,16	-0,15	-0,18	-0,23	-0,05	-0,25	-0,06	-0,16	-0,10	0,26	-0,19	0,04	0,54	0,57	-0,04	-0,12	0,03	1					
Ga	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,88	0,67	0,88	1,00	0,87	0,61	0,73	0,91	0,24	0,24	0,88	1,00	0,96	-0,12	1				
As	0,51	0,52	0,51	0,50	-0,15	0,58	0,15	0,57	0,52	0,59	0,89	0,41	0,66	0,75	0,76	0,58	0,51	0,49	0,17	0,51	1			
Se	0,99	1,00	1,00	0,96	0,21	0,88	0,68	0,88	1,00	0,87	0,61	0,79	0,91	0,21	0,21	0,88	1,00	0,96	-0,16	1,00	0,52	1		
Rb	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,89	0,67	0,89	1,00	0,88	0,61	0,76	0,91	0,22	0,22	0,89	1,00	0,95	-0,15	1,00	0,51	1,00	1	
Sr	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,89	0,67	0,88	1,00	0,88	0,61	0,75	0,91	0,23	0,23	0,88	1,00	0,96	-0,13	1,00	0,52	1,00	1,00	1
Y	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,89	0,67	0,88	1,00	0,88	0,61	0,74	0,91	0,23	0,23	0,88	1,00	0,95	-0,14	1,00	0,52	1,00	1,00	1,00
Zr	-0,17	-0,25	-0,22	-0,07	-0,08	-0,22	-0,18	-0,22	-0,25	-0,22	-0,13	-0,73	-0,21	0,28	0,28	-0,20	-0,24	-0,15	0,50	-0,18	-0,12	-0,27	-0,22	-0,21
Nb	1,00	1,00	1,00	0,98	0,21	0,88	0,67	0,88	1,00	0,87	0,61	0,72	0,90	0,24	0,24	0,88	0,99	0,96	-0,12	1,00	0,51	0,99	1,00	1,00
Mo	1,00	1,00	1,00	0,96	0,21	0,89	0,67	0,89	1,00	0,88	0,61	0,77	0,90	0,21	0,21	0,88	1,00	0,95	-0,16	1,00	0,51	1,00	1,00	1,00
Cd	0,61	0,61	0,61	0,59	-0,17	0,68	0,32	0,67	0,62	0,42	0,55	0,49	0,71	0,35	0,34	0,42	0,61	0,59	0,15	0,61	0,24	0,61	0,61	0,61
Sn	0,35	0,33	0,34	0,36	-0,20	0,41	-0,21	0,40	0,33	0,42	0,87	0,11	0,51	0,97	0,96	0,42	0,33	0,34	0,46	0,35	0,74	0,32	0,33	0,34
Cs	0,70	0,70	0,70	0,68	-0,20	0,78	0,21	0,77	0,71	0,53	0,87	0,56	0,88	0,59	0,61	0,79	0,70	0,67	0,19	0,70	0,74	0,70	0,70	0,70
Ba	0,20	0,18	0,19	0,16	-0,27	0,27	-0,32	0,26	0,18	0,23	0,77	0,13	0,41	0,92	0,95	0,32	0,21	0,29	0,65	0,21	0,59	0,18	0,19	0,20
Hf	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,89	0,67	0,89	1,00	0,88	0,61	0,75	0,91	0,22	0,22	0,89	1,00	0,95	-0,15	1,00	0,51	1,00	1,00	1,00
Ta	0,79	0,79	0,79	0,77	-0,23	0,64	0,36	0,63	0,79	0,64	0,77	0,63	0,90	0,46	0,48	0,89	0,79	0,76	0,07	0,79	0,65	0,79	0,79	0,79
W	0,70	0,70	0,70	0,68	-0,20	0,78	0,20	0,77	0,70	0,53	0,87	0,56	0,87	0,60	0,61	0,78	0,70	0,67	0,20	0,70	0,74	0,69	0,70	0,70
Au	0,31	0,32	0,32	0,30	0,68	0,37	0,48	0,37	0,32	-0,02	-0,14	0,24	0,24	-0,32	-0,33	0,37	0,31	0,30	-0,26	0,31	-0,23	0,32	0,32	0,31
Hg	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,88	0,67	0,88	1,00	0,87	0,60	0,77	0,90	0,20	0,20	0,88	1,00	0,95	-0,18	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00
Pb	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,88	0,67	0,88	1,00	0,87	0,61	0,74	0,90	0,24	0,24	0,88	1,00	0,97	-0,11	1,00	0,51	1,00	1,00	1,00
Bi	0,70	0,70	0,70	0,68	-0,20	0,78	0,21	0,77	0,71	0,53	0,87	0,57	0,88	0,59	0,61	0,79	0,70	0,67	0,19	0,70	0,74	0,70	0,70	0,71
Th	1,00	1,00	1,00	0,97	0,21	0,89	0,67	0,88	1,00	0,88	0,61	0,74	0,91	0,23	0,23	0,88	1,00	0,96	-0,13	1,00	0,52	1,00	1,00	1,00
U	0,79	0,79	0,79	0,77	-0,23	0,64	0,36	0,63	0,79	0,64	0,77	0,62	0,90	0,46	0,48	0,89	0,79	0,75	0,07	0,79	0,65	0,79	0,79	0,79
La	1,00	0,99	1,00	0,97	0,20	0,88	0,67	0,88	0,99	0,87	0,61	0,72	0,90	0,25	0,25	0,88	0,99	0,96	-0,11	1,00	0,51	0,99	1,00	1,00
Ce	0,97	0,96	0,97	0,96	0,19	0,85	0,64	0,85	0,96	0,84	0,60	0,61	0,87	0,30	0,29	0,85	0,96	0,94	-0,02	0,97	0,50	0,95	0,96	0,97



