

## Resultados preliminares de espectroscopia de reflectância em testemunho de sondagem (AG-01) na região da mina de Pb-Zn-Ag (Ba-Cu) do Perau, leste do Paraná, Cinturão Ribeira, Província Mantiqueira

Manoel Augusto Corrêa da Costa<sup>1</sup>  
Mônica Mazzini Perrotta<sup>1</sup>  
Anderson Dourado Rodrigues da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM  
R. Costa, 55 - 01304-010 – São Paulo - SP, Brasil  
{manoel.costa, monica.perrotta, anderson.rodrigues}@cprm.gov.br

**Abstract.** The Ribeira mobile belt in the Mantiqueira Province, southeastern Brazil, is historically known by the occurrence of important Pb-Zn deposits. The Perau Pb-Zn-Ag (Ba-Cu) deposit is interpreted as a sedimentary exhalative (SEDEX) system that was metamorphised at greenschist and amphibolite facies conditions. Here we present preliminary results on reflectance spectroscopy applied to mineral mapping of host rocks and alteration zones along the drill core AG-01 in the Perau mine. Visible and infrared (VNIR-SWIR; 0.4-2,5  $\mu\text{m}$ ) lab spectroscopy was conducted using the ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution spectrometer. Contact spectral measurements allowed the identification of distinct mineral groups, including Fe/Mg-chlorites and biotites, sericites (illite and muscovite), smectites (montmorillonite), amphiboles (hornblende and actinolite), Fe-carbonates and sulphates (gypsum). Gypsum was preliminarily identified in spectral mixtures dominated by Fe-carbonate absorption features. Compositional trends of Mg-rich chlorites (FeOH absorption  $< 2.248 \mu\text{m}$ ) and phengitic sericites (AlOH absorption  $> 2.214 \mu\text{m}$ ), as well as the presence of actinolite (secondary MgOH absorption  $< 2.386 \mu\text{m}$ ) and Fe-carbonate (diagnostic  $\text{Fe}^{2+}$  absorption  $> 1.240 \mu\text{m}$ ), are strongly correlated with hydrothermal alteration zones close to the Pb-Zn-Ag (Ba-Cu) ore body, and suggest a mineral system dominated by fluids rich in Fe, Mg and Ca. This mineral assemblage identified by reflectance spectroscopy is coherent with others SEDEX classic deposits in the world (e.g. HYC deposit, McArthur Basin, Australia), except by the dominant presence of Mg-rich chlorite in the proximal alteration zones.

**Palavras-chave:** spectral analysis, hydrothermal alteration zones, compositional trend, sedimentary exhalative system, análises espectrais, zonas de alteração hidrotermal, tendência composicional, sistema sedimentar exalativo.

### 1. Introdução

Nacionalmente conhecida como produtora de chumbo, a região do Vale do Ribeira, foi responsável até o ano de 1954 por todo o minério de chumbo produzido no país. Na década de 70, o reconhecimento do minério na região do Perau direcionou os trabalhos de pesquisa mineral de empresas estatais e privadas. Trata-se de uma sequência vulcano-sedimentar de fundo oceânico com formação de depósitos tipo SEDEX (sedimentar-exalativo), que sofreu metamorfismo na fácies xisto-verde inferior a anfíbolito (Daitx, 1996).

Os sistemas minerais em depósitos do tipo SEDEX são tipicamente hospedados em rochas sedimentares carbonáticas relacionadas a sedimentos dolomíticos, que em muitos casos produzem halos de alteração Fe-Mn carbonática (ex.: depósito HYC, na Bacia McArthur, Austrália; Large e McGoldrick, 1999). Estes halos podem conter carbonatos ricos em Fe como siderita, Fe-dolomita e ankerita, com variações no conteúdo de Mn em direção a mineralização. As alterações hidrotermais associadas a estes depósitos também desenvolvem diversos sulfetos, bem como podem estar hospedados tanto em rochas carbonáticas como sedimentos grafitosos. Outros minerais e produtos de alteração hidrotermal que podem ocorrer associados a estes depósitos são: barita, micas brancas, cloritização, albitização, turmalinização e alteração argílica (Pontual *et al.*, 2008a).

As variações químico-mineralógicas causadas por processos hidrotermais podem ser percebidas por meio da Espectroscopia de Reflectância (ER). Nesse sentido, a ER vem sendo

comumente utilizada na prospecção mineral, por meio da identificação de minerais índices de zonas de alteração hidrotermal e/ou desenvolvimento de vetores/gradientes composicionais indicadores da proximidade dos depósitos minerais associados a estas zonas.

Nesse contexto, este trabalho apresenta os primeiros resultados a respeito da aplicação da Espectroscopia de Reflectância ao longo do testemunho de sondagem AG-01, relativo à mineralização de Pb-Zn-Ag (Ba-Cu) da mina do Perau (leste do Paraná; Figura 1a), bem como avaliar sua correlação com depósitos do tipo SEDEX descritos em termos de suas assinaturas espectrais.

### 1.1 Geologia Regional e contexto da mineralização

A área de estudo situa-se na porção meridional do Cinturão Ribeira (Almeida et al., 1973), integrante da Província Mantiqueira (Almeida et al., 1981). O Cinturão Ribeira consiste de um complexo orógeno colisional que abrange rochas gnáissicas, migmatíticas e metassedimentares, de idade arqueana a neoproterozoica (bem como granitoides neoproterozoicos), além de intrusões alcalinas e diques básicos mesozoicos, sequências vulcanossedimentares eopaleozoicas e coberturas sedimentares paleozoicas e cenozoicas.

Os depósitos de Pb-Zn-Ag (Ba-Cu) associados a Formação Perau ocorrem na porção nordeste dessa faixa em associação com lentes de rochas calciosilicáticas, no horizonte denominado de “Horizonte Perau” (Silva, 1981; Figura 1b). Este horizonte situa-se na porção basal das lentes de rochas carbonáticas da unidade de xisto e é composto, da base para o topo, por uma camada de grafita-mica xisto, pela zona mineralizada polimetálica, contendo sulfetos de Pb-Zn-Ag-(Cu), por uma camada de barita, e por uma camada de xisto enriquecida em magnetita, considerada como camada-guia para a mineralização. É um depósito estratiforme, de direção geral NE-SW e com zonação mineralógica vertical e lateral, cuja geometria é influenciada pelos processos tectônicos, caracterizando um formato em “S” devido à presença de dobras. Lenticularização lateral das camadas e truncamentos por falhas normais interferem na espessura e continuidade do horizonte de minério (Silva, 1981; Daitx, 1996).

## 2. Materiais e Métodos

As análises espectrais foram realizadas com o espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution*, com alcance espectral do visível ao infravermelho de ondas curtas, no intervalo de 350 a 2500 nm e resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1400 nm) e 6,5 nm (em 2500 nm), num total de 2151 bandas, no Laboratório de Espectroscopia Mineral da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE) do Serviço Geológico do Brasil (SGB / CPRM), em São Paulo (SP). A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi feita por meio dos programas ENVI© 5.3 e *The Spectral Geologist*© (TSG). Foram utilizadas as bibliotecas espectrais de referência fornecidas pelo USGS (*United States Geological Survey*) (Clark et al., 1993), pelo, e pela AUSSPEC *International (Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration – Pontual et al., 2008b)*.

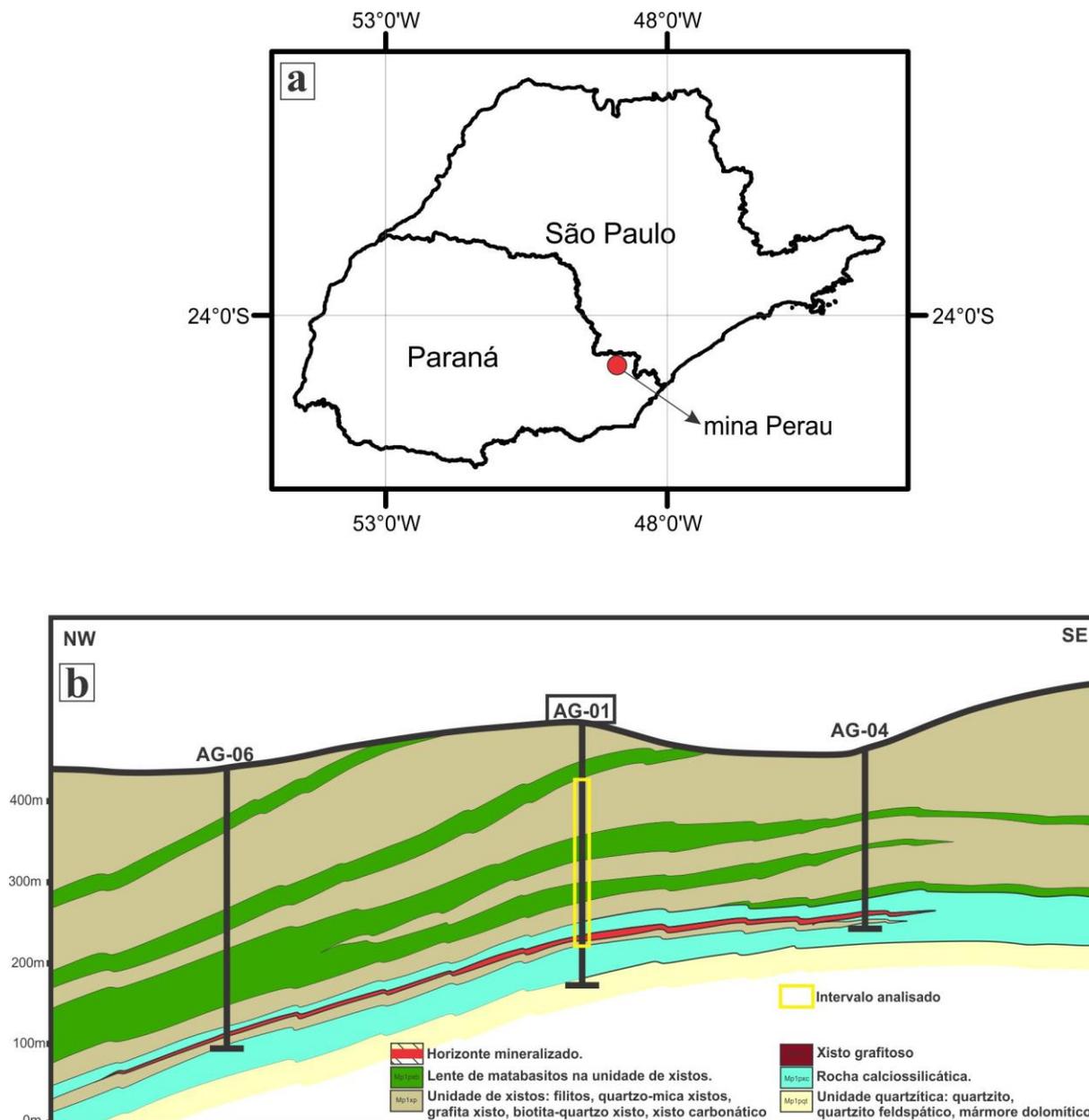


Figura 1. a) Localização da mina do Perau no Estado do Paraná; b) Seção geológica com os dados das descrições e as interpretações dos furos de sondagem do Projeto Anta Gorda, e intervalo do testemunho de sondagem AG-01 analisado neste trabalho (Modificado de Daitx *et al.*, 1983).

### 3. Resultados e Discussão

Foram realizadas 65 análises espectrais ao longo do testemunho de sondagem AG-01, no intervalo de 71,85 m a 272,90 m, ao longo das rochas encaixantes, bem como na própria mineralização de Zn-Pb (“Horizonte Perau”). Foi possível identificar diferentes assembleias minerais (que compreendem os grupos das cloritas, sericitas, esmectitas, anfibólios, carbonatos e sulfatos), bem como avaliar a variabilidade composicional dos minerais ao longo do testemunho de sondagem. A tabela 1 resume as principais assembleias minerais identificadas por meio da Espectroscopia de Reflectância, para cada litologia ou zona mineralizada, bem como as principais feições de absorção observadas na região do SWIR.

Tabela 1. Principais minerais / misturas minerais identificados por meio da Espectroscopia de Reflectância no testemunho de sondagem AG-01. (qz: quartzo; grph: grafita; se: sericita; py: pirita; po: pirrotita; ga: granada; bi: biotita; mt: magnetita; anf: anfibólio; carb: carbonato; tr: tremolita).

Testemunho de Sondagem AG-01			Principais feições de absorção diagnósticas ( $\mu\text{m}$ ) - SWIR			
Prof. (metros)	Litologia	Minerais	AIOH	FeOH	MgOH/CO <sub>3</sub>	MgOH (sec.)
71,85-90,00	qz-bi-se xisto com py/po	muscovita + Fe/Mg-clorita/biotita	2,198 - 2,202	2,253 - 2,259	2,321	-
135,00-149,50	anfíbolito+anfíbolio xisto	hornblenda + Fe/Mg-clorita + montmorilonita $\pm$ Fe-carbonato (provável Fe-dolomita)	2,209	2,249 - 2,254	2,314 - 2,332	2,387 - 2,389
180,85-189,85	ga-se xisto	ilita muscovítica + Fe/Mg-clorita/biotita	2,198 - 2,207	2,249 - 2,253	2,344* - 2,347*	-
233,60-240,77	anf-carb-bi-mt xisto**	hornblenda + actinolita + Fe/Mg-clorita + ilita muscovítica + gipso (?) $\pm$ Fe-carbonato (provável Fe-dolomita)	2,202 - 2,213	2,246 - 2,250	2,317 - 2,329	2,382 - 2,390
242,35-251,15	tr-bi-carb xisto	actinolita + hornblenda + Fe/Mg-clorita $\pm$ gipso (?) $\pm$ ilita muscovítica $\pm$ Fe-carbonato (provável Fe-dolomita)	2,206 - 2,212	2,245 - 2,250	2,318 - 2,341*	2,384 - 2,389
256,60-263,25	zona mineralizada	Fe-carbonato (provável Fe-dolomita) + gipso (?) $\pm$ sericita (fengítica) $\pm$ actinolita	2,209 - 2,215	-	2,319 - 2,322	2,385
263,50-265,70	zona fracamente mineralizada	actinolita + Fe/Mg-clorita/biotita $\pm$ ilita muscovítica $\pm$ Fe-carbonato (provável Fe-dolomita) $\pm$ gipso(?)	2,206 - 2,216	2,244 - 2,249	2,312 - 2,330	2,384 - 2,388
266,70-268,40	grph xisto com py	sericita fengítica + ankerita/siderita (?) + gipso (?)	2,214 - 2,218	2,253 - 2,256	2,334 - 2,338	-
272,90	tr-bi-carb xisto (cinza) / calcário dolomítico	montmorilonita $\pm$ hornblenda $\pm$ clorita	2,208 - 2,212	~2,248	2,316 - 2,318	~2,390

\* provável interferência de feições de absorção secundárias das sericitas na posição da absorção;

\*\* zona da magnetita (“camada guia” da mineralização).

Apenas os xistos com pirita / pirrotita apresentaram as assinaturas espectrais menos expressivas, em termos de feições de absorção, possivelmente devido à presença de sulfetos (Pontual *et al.*, 2008a). As demais litologias analisadas ao longo do testemunho de sondagem apresentaram bons resultados, permitindo a identificação de diversas feições de absorção diagnósticas dos minerais. A barita, comum a estes depósitos, não possui feições de absorção diagnósticas e, portanto, não pôde ser identificada pela Espectroscopia de Reflectância.

**3.1 Cloritas / Biotitas** – A assinatura espectral das biotitas pode se confundir principalmente com aquelas referentes às cloritas, onde há misturas destes com outros minerais. A ocorrência de clorita pode ser identificada pela presença da feição de absorção no VNIR em aproximadamente 0,750  $\mu\text{m}$ . A presença exclusiva de biotita nas assinaturas espectrais do testemunho foi constatada principalmente nas litologias classificadas como sericita xistos, bem como nos carbonato xistos fracamente mineralizados. As cloritas ocorrem ao longo de todo o intervalo estudado, e possuem composições variadas em termos de conteúdo de Fe/Mg, de acordo com a variação na posição da feição absorção atribuída à presença da molécula de FeOH (2,245  $\mu\text{m}$  = Mg-Cloritas a 2,261  $\mu\text{m}$  = Fe-Cloritas; Pontual *et al.*, 2008b). As cloritas de composição com tendência magnesiânica (2,246 – 2,248  $\mu\text{m}$ ) ocorrem principalmente na litologia classificada como anfibólio carbonato biotita magnetita xisto (zona da magnetita), em direção à mineralização (Figura 2). Nesse sentido, pode-se dizer que há uma tendência de correlação entre as cloritas de composição magnesiânica e a “camada-guia” (zona da magnetita) da mineralização de Zn-Pb neste testemunho de sondagem.

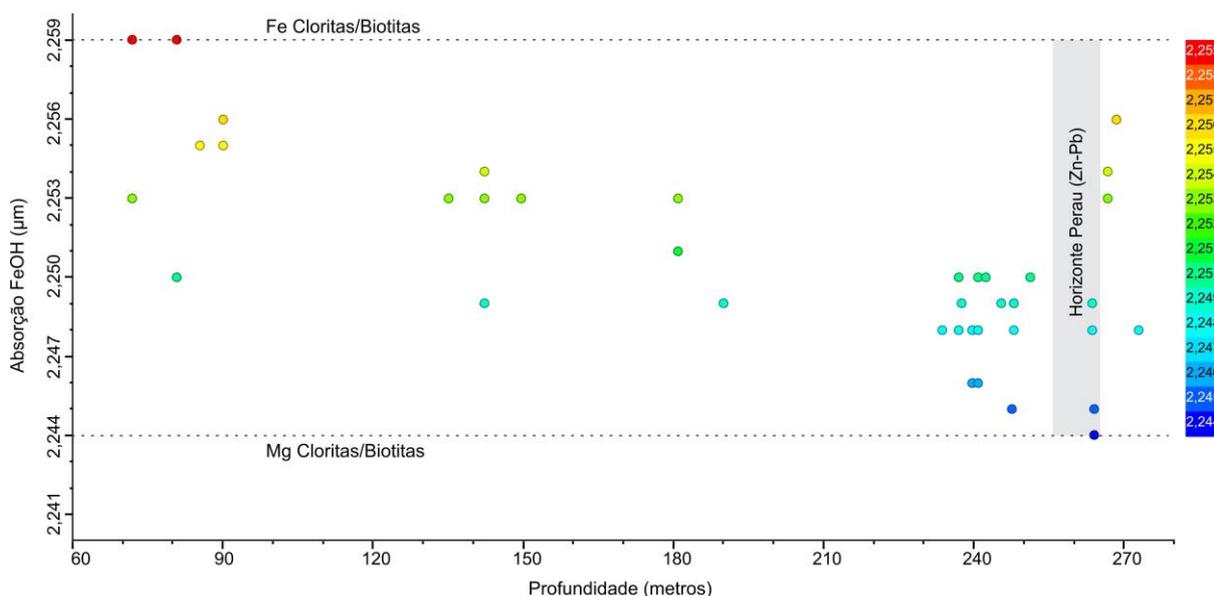


Figura 2. Diagrama de posição da feição de absorção atribuída à presença da molécula de FeOH na estrutura cristalina das cloritas/biotitas, ao longo do testemunho de sondagem AG-01 (relação entre o intervalo de comprimento de onda da feição versus composição das cloritas/biotitas segundo Pontual *et al.*, 2008b).

**3.2 Sericitas / Esmectitas** – As micas brancas e ilitas foram identificadas ao longo de todo o testemunho analisado, sendo que as de composição muscovítica (ou potássica) são predominantes nas diferentes litologias. A feição de absorção referente às moléculas de AlOH presentes na estrutura destes minerais varia em geral entre 2,198 e 2,212  $\mu\text{m}$  (composição potássica). Há uma tendência de que esta feição ocupe posições em comprimentos de onda

mais elevados a partir dos carbonato xistos ou anfibólio carbonato biotita magnetita xisto (zona da magnetita) e grafita xistos (até  $\sim 2,218 \mu\text{m}$ ) que ocorrem próximos à zona mineralizada (Figura 3). Neste caso, há uma correlação entre as micas brancas de composição fengítica (Fe/Mg) e a mineralização. As esmectitas ocorrem com pouca frequência ao longo do testemunho, e foram identificadas nos anfibolitos e carbonato xistos ou anfibólio carbonato biotita magnetita xisto. Foi descrita apenas a montmorilonita, que se distingue das sericitas principalmente pela acentuada feição de absorção em  $\sim 1,904 \mu\text{m}$  (devido a moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  na estrutura do mineral), bem como pela ausência de feições secundárias em  $\sim 2,342$  e  $\sim 2,435 \mu\text{m}$ .

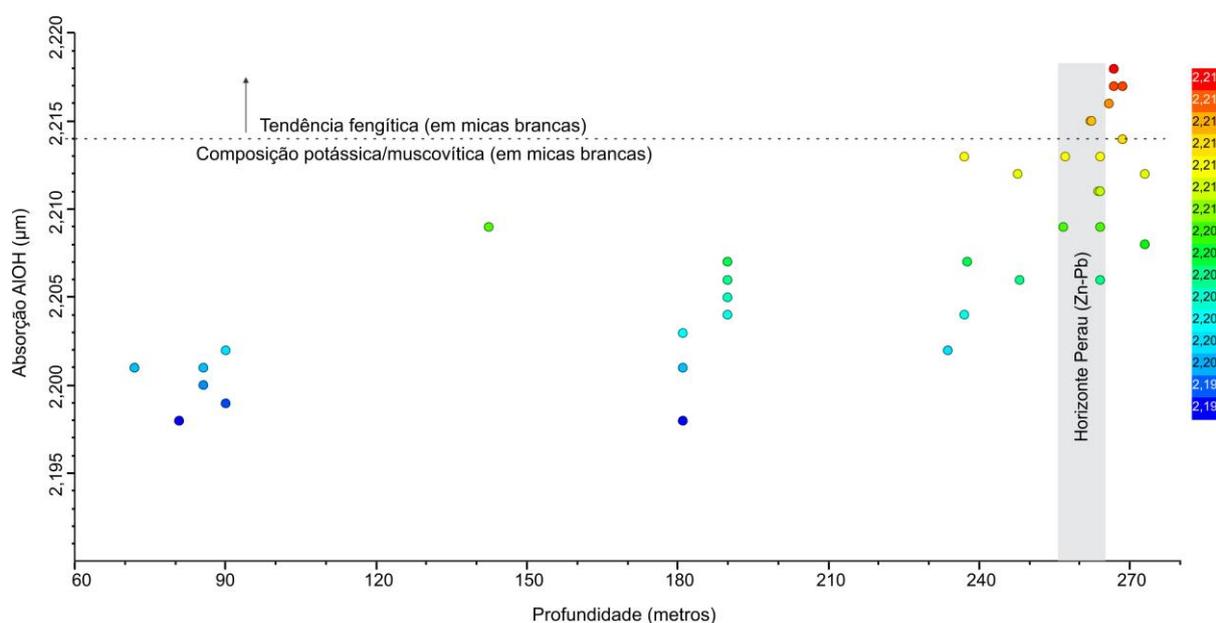


Figura 3. Diagrama de posição da feição de absorção atribuída à presença da molécula de AIOH na estrutura cristalina dos minerais (principalmente sericitas), ao longo do testemunho de sondagem AG-01 (relação entre o intervalo de comprimento de onda da feição versus composição das micas brancas segundo Pontual *et al.*, 2008b).

**3.4 Anfibólios** – Os anfibólios identificados foram a hornblenda e a actinolita. A distinção entre estes dois minerais nas misturas espectrais analisadas se dá principalmente pela posição da feição de absorção secundária atribuída à presença de  $\text{MgOH}$  na estrutura dos minerais: enquanto na hornblenda esta feição ocupa posições próximas à  $2,390 \mu\text{m}$ , na actinolita esta feição ocupa posições com comprimento de onda menores, próximos a  $2,384 \mu\text{m}$ . Aparentemente a hornblenda ocorre nas porções mais distais à mineralização, principalmente nos anfibolitos. A actinolita ocorre de maneira mais restrita nos carbonato xistos ou anfibólio carbonato biotita magnetita xisto (zona da magnetita) e zonas mineralizadas, e pode corresponder ao halo de alteração hidrotermal mais adjacente da mineralização.

**3.5 Carbonatos** – O principal carbonato identificado ao longo do testemunho foi o Fe-carbonato, provável Fe-dolomita. A presença de Fe-carbonato pôde ser percebida de maneira discreta nas assinaturas espectrais dos anfibolitos e carbonato xistos ou anfibólio carbonato biotita magnetita xisto (zona da magnetita), principalmente por meio das duas feições de absorção atribuídas à presença de  $\text{Fe}^{2+}$  em aproximadamente  $1,060$  e  $1,270 \mu\text{m}$  (VNIR), juntamente da feição de absorção relativa à molécula de  $\text{CO}_3$ , em aproximadamente  $2,321 \mu\text{m}$  (SWIR). Há uma tendência de que a segunda feição de absorção atribuída à presença de  $\text{Fe}^{2+}$

nas misturas minerais analisadas (variação entre 1,106 e 1,278  $\mu\text{m}$ ) ocupe posições cada vez mais elevadas em direção à mineralização, sendo correlacionável ao aumento no conteúdo de Fe-carbonato ao longo do testemunho (Figura 4).

O Fe-carbonato é predominante na zona mineralizada do testemunho. Neste segmento, nota-se pouca variação na posição da feição de absorção em 2,321  $\mu\text{m}$ , devido à ausência de outros minerais que poderiam sobrepor esta feição em misturas espectrais (anfíbólios, por exemplo, que possuem feições de absorção da molécula de MgOH nesta mesma posição). Ao longo do testemunho, após a zona mineralizada, nota-se um deslocamento da principal feição diagnóstica da molécula de  $\text{CO}_3$ , que assume posições mais elevadas em aproximadamente 2,334  $\mu\text{m}$  (em grafita xistos, zona estéril).

**3.6 Sulfatos** – Existem evidências da presença de gipso em assinaturas relativas às misturas espectrais, onde Fe-dolomita é predominante. Nestas misturas, este mineral pôde ser inferido principalmente pelas feições de absorção em aproximadamente 1,747 e 1,943  $\mu\text{m}$ . Evidências da presença de gipso ocorrem principalmente nos carbonato xistos e zonas mineralizadas, e em menor frequência nos grafita xistos e anfibólio carbonato biotita magnetita xisto.

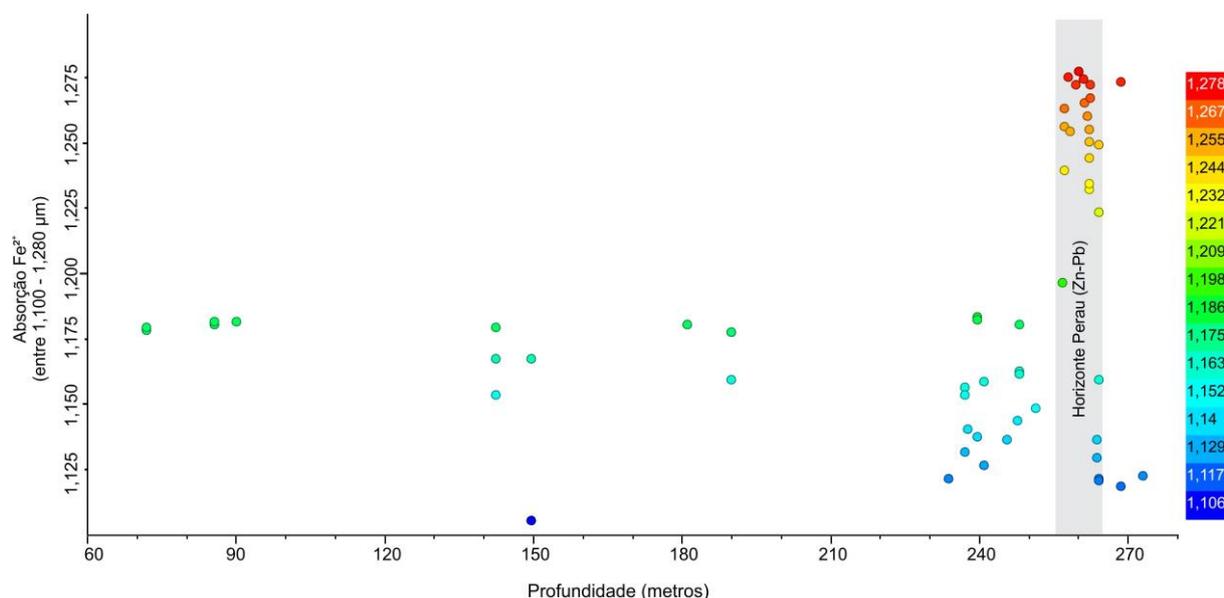


Figura 4. Diagrama de posição da segunda feição de absorção atribuída à presença do cátion  $\text{Fe}^{2+}$  na estrutura cristalina dos minerais (principalmente cloritas, anfíbólios e Fe-carbonatos), ao longo do testemunho de sondagem AG-01.

#### 4. Conclusões

A Tabela 2 resume as principais correlações encontradas neste estudo, bem como as posições (comprimento de onda) das feições de absorção de maior potencial prospectivo, no âmbito do testemunho de sondagem AG-01. Os resultados sugerem a entrada de fluidos ricos em Ca, Fe e Mg em direção à mineralização, onde a paragênese mineral é representada principalmente por actinolita, Mg-clorita, sericita fengítica (ferromagnesian) e Fe-carbonato (provável Fe-dolomita). A correlação entre micas de composição fengítica com a proximidade da zona mineralizada em Zn-Pb Perau corrobora com as conclusões obtidas por Pontual *et al.* (2008a) em depósitos sedimentares exalativos. O aumento no conteúdo de ferro nos carbonatos em direção à zona mineralizada também corrobora com as conclusões obtidas pelos mesmos autores. No caso das cloritas e biotitas, foi constatada uma relação inversa

àquela sugerida por estes autores (onde as cloritas mais enriquecidas em ferro é que estão mais próximas à mineralização), sendo que no presente trabalho a composição mais rica em magnésio das cloritas é a que melhor se correlaciona com as zonas próximas à mineralização de Pb-Zn-Ag (Ba-Cu) do Perau. A identificação de sulfatos (gipso) ao longo do testemunho de sondagem analisado é pouco conhecida em descrições anteriores. No entanto, técnicas analíticas complementares são necessárias no intuito de se atestar a presença do gipso, bem como entender a gênese dos sulfatos neste sistema mineral.

Tabela 2. Síntese das posições das feições de absorção de maior potencial de correlação com a zona hidrotermalizada / mineralizada no testemunho de sondagem AG-01.

Minerais	Feição de absorção	Posição da feição ( $\mu\text{m}$ )
anfíbolios	MgOH (secundária)	<~2,386 (actinolitas)
sericitas (micas brancas)	AlOH	>2,214 (fengíticas)
cloritas/biotitas	FeOH	<2,248 (magnesianas)
carbonatos	Fe <sup>2+</sup>	>1,240 (Fe-carbonatos)

### Agradecimentos

Equipe do projeto ARIM – Faixa Ribeira, CPRM – São Paulo; Jaqueline Lima Rodrigues (técnica DISEGE /análises espectrais).

### Referências Bibliográficas

- Almeida, F.F.M. de; Amaral, G.; Cordani, U.G.; Kawashita, K. The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazonas river. In: Nairn, A.E.M.; Stille, F.G. (Ed.). **The ocean basin and margins**. New York: Plenum, 1973. v. 1, p. 411-446.
- Almeida, F.F.M. de; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth Science Review**, Amsterdam, v. 17, n. 1, p. 1-29, 1981.
- Clark, R. N.; Swayze, G. A.; Gallagher, A.; King, T. V. V.; Calvin, W. M. **The U. S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 mm**. [EUA]: USGS, 1993. 1326 p. (Open File Report, 592).
- Daitx, E. C.; Takahashi, A. T.; Ferreira, J. C. G.; Silva, C. R.; Maeyama, O. **Projeto Anta gorda, fase IV. Relatório de Atividades**. São Paulo, DNPM/CPRM, 1. 1983. 24p.
- Daitx, E. C. **Origem e evolução dos depósitos tipo Perau (Pb-Zn-Ag), com base nas jazidas Canoas e Perau, Vale do Ribeira-PR**. 1996. 435p. Diss. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, UNESP, Rio Claro. 1996.
- Large, R.R.; McGoldrick, P.J. Carbonate alteration halos associated with Australian Proterozoic stratiform Zn-Pb-Ag deposits. In: **Codes Special Publication 2, "Basins, Fluids and Zn-Pb Ores"**, Eds. Holm, Pongratz and McGoldrick, 1999.
- Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **G-MEX – Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration – Sedimentary Exhalative Deposits**. AusSpec International Pty., Ltd., Kew, Victoria 3101, Australia, 2008b. 50p.
- Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **G-MEX – Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration – Spectral Interpretation Field Manual**. AusSpec International Pty., Ltd., Kew, Victoria 3101, Australia, 2008a. 189p.
- Silva, A.T.S.F. **Projeto integração e detalhe geológico no Vale do Ribeira: relatório final de integração geológica**. São Paulo: DNPM/CPRM, 1981. 15 v.